

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

«На правах рукопису»

До захисту допущено

УДК 678

Завідувач кафедри, д-р. техн. наук, проф.

_____ Я.М. Корнієнко

“ _____ ” _____ 2018 р.

МАГІСТЕРСЬКА ДИСЕРТАЦІЯ

зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

на тему: **Процес екструзії полімер-каучукових сумішей**

Виконав: студент VI курсу, групи ЛН-61м

Гоцький Ярослав Григорович

Науковий керівник: кандидат технічних наук,

старший викладач Двойнос Я. Г.

Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних
ситуаціях канд. техн. наук, доцент Ковтун І. М.

Розроблення стартап проекту доцент кафедри

промислового маркетингу, канд. екон. наук Юдіна Н. В.

Рецензент _____

(посада вчене звання науковий ступінь , прізвище і ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада вчене звання науковий ступінь , прізвище і ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____ Я.Г. Гоцький

Київ 2018

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

Освітній ступінь: Магістр

ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 13 «Механічна інженерія»

СПЕЦІАЛЬНІСТЬ 133 «Галузеве машинобудування»

СПЕЦІАЛІЗАЦІЯ Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та нафтопереробних виробництв

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, д-р. техн. наук, проф.

_____ Я.М. Корнієнко

«__» _____ 2018 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію

студенту Гоцькому Ярославу Григоровичу

1. Тема дисертації: Процес екструзії полімер-каучукових сумішей.

Науковий керівник: Двойнос Ярослав Григорович к.т.н., старш. викладач

Затверджена наказом по університету від «21» березня 2018 р. № 979-с.

2. Термін подання студентом дисертації: 24 квітня 2018 р.

3. Об'єкт дослідження: процес змішування поліетилен-каучукових композицій в одночерв'ячному екструдері.

4. Предмет дослідження: вплив геометричних розмірів змішувальних елементів черв'яка на процес перемішування поліетилен-каучукових композицій в одночерв'ячному екструдері.

5. Перелік питань, які потрібно розробити:

- визначити основні параметри процесу змішування поліетилен-каучукових композицій, що впливають на процес змішування неоднорідних сумішей;
- сформулювати фізичну модель процесу диспергуючого змішування в робочих зазорах змішувального елемента;
- сформулювати математичну модель процесу течії розплаву у робочих зазорах змішувального елемента одночерв'ячного екструдера, зробити необхідні припущення;
- розробити алгоритм та програму розрахунку математичної моделі процесу течії розплаву у робочих зазорах змішувального елемента;
- розробити методику досліджень, провести експерименти капілярної віскозиметрії для визначення реологічних властивостей поліетилен-каучукових композицій в достатній кількості з необхідною точністю;
- розробити методику визначення та програму розрахунку визначення реологічних властивостей розплаву композиції;
- перевірити адекватність математичної моделі;
- отримати залежності основних параметрів проведення процесу змішування від геометричних розмірів змішувального елемента, та розробити рекомендації для проектування нових конструкцій змішувальних елементів в залежності від реологічних властивостей полімерних композицій.

6. Перелік ілюстративного матеріалу: креслення черв'яка (A3×4), презентація магістерської дисертації.

7. Перелік публікацій: заплановано публікування двох статей в наукових фахових виданнях України, участь у 6 конференціях з опублікуванням 6 тез доповідей та отримання двох патентів України на корисну модель.

8. Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях та розроблення стартап проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	канд. техн. наук, доцент Ковтун І.М.		
Розроблення стартап проекту	канд. екон. наук, доцент Юдіна Н.В.		

9. Дата видачі завдання: „ 09 ” вересня 2016 р.

Завдання прийняв до виконання _____ Я. Г. Гоцький
(підпис, дата)

Науковий керівник дисертації к.т.н., ст. викл. _____ Я. Г. Двойнос
(підпис, дата)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів дисертації	Примітка
1	2	3	4
1	Аналіз літературних і патентних джерел по дослідженню процесу екструзії полімер-каучукових сумішей. Формулювання задач теоретичних та експериментальних досліджень.	01.10.2016 – 27.12.2016	
2	Розробка фізичної та математичної моделі процесу течії . Вибір та обґрунтування методів розв'язання математичної моделі.	05.01.2017 – 30.04.2017	
3	Формулювання процесу проведення дослідів. Удосконалення методики проведення експериментів.	13.08.2017 – 30.09.2017	
4	Проведення експериментальних досліджень капілярної віскозиметрії.	03.10.2017 – 08.11.2017	
5	Обробка та узагальнення результатів дослідження. Розробка програми розрахунку експериментальних даних	08.11.2017 – 14.12.2017	
6	Висновки й рекомендації щодо проектування нових конструкцій змішувальних елементів.	16.03.2018 – 25.03.2018	

1	2	3	4
7	Підготовка матеріалів з результатами досліджень до публікації статей у фахових виданнях і до публікації тез доповідей та участі у конференції	26.03.2018 – 15.04.2018	
8	Попередній захист	24.04.2018	
9	Оформлення кваліфікаційної роботи магістра та її підготовка до захисту.	27.04.2018 – 20.05.2018	

Студент

_____ Я. Г. Гоцький
(підпис, дата)

Науковий керівник дисертації к.т.н., ст. викл. _____ Я. Г. Двойнос
(підпис, дата)

РЕФЕРАТ

УДК 678

Магістерська дисертація на тему: «Процес екструзії полімер–каучукових сумішей» / НТУУ «КПІ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»; Керівник Я. Г. Двойнос. – К., 2018. – 165 с., 39 іл. – Виконавець Я. Г. Гоцький. – Бібліограф.: 223 с.

Об’єкт дослідження: процес змішування поліетилен-каучукових композицій в одночерв’ячному екструдері.

Предмет дослідження: вплив геометричних розмірів змішувальних елементів черв’яка на процес перемішування поліетилен-каучукових композицій в одночерв’ячному екструдері.

Метою дисертаційної роботи є встановлення закономірностей якості змішування від геометричних розмірів змішувального елемента для підвищення ефективності проведення процесу змішування полімер–каучукових композиційних матеріалів.

Наведено інформацію про походження проблеми змішування полімер–каучукових композицій та аналіз методики експериментальних досліджень.

Сформульовано фізичну модель процесу гомогенізації в умовах деформації зсуву неоднорідної суміші каучуку з поліетиленом у робочих зазорах.

Сформульовано математичну модель течії розплаву у робочих зазорах змішувального елемента при гомогенізації полімер–каучукових композицій, розроблено алгоритм та програму розрахунку математичної моделі процесу.

Розроблено рекомендації щодо проектування нових конструкцій змішувальних елементів.

ПОЛІМЕР–КАУЧУКОВІ КОМПОЗИЦІЇ, ПОЛІЕТИЛЕН,
СИЛІКОНОВИЙ КАУЧУК, ЕКСТРУЗИЯ, ЗМІШУВАННЯ, ЕЛЕМЕНТ
МЕДДОКА, ЕКСТРУДЕР

РЕФЕРАТ

УДК 678

Магистерская диссертация на тему: «Процесс экструзии полимер-каучуковых смесей» / НТУУ «КПИ имени ИГОРЯ СИКОРСКОГО»; Руководитель Я. Г. Двойнос. - М., 2018. - 165 с., 39 ил. - Исполнитель Я. Г. Гоцкий. - Библиограф .: 223 с.

Объект исследования: процесс смешивания полиэтилен-каучуковых композиций в одношнековом экструдере.

Предмет исследования: влияние геометрических размеров смесительных элементов червяка на процесс перемешивания полиэтилен-каучуковых композиций в одношнековом экструдере.

Целью диссертационной работы является установление закономерностей качества смешивания от геометрических размеров смесительного элемента для повышения эффективности проведения процесса смешивания полимер-каучуковых композиционных материалов.

Приведена информация о происхождении проблемы смешивания полимер-каучуковых композиций и анализ методики экспериментальных исследований.

Сформулировано физическую модель процесса гомогенизации в условиях деформации сдвига неоднородной смеси каучука с полиэтиленом в рабочих зазорах.

Сформулировано математическую модель течения расплава в рабочих зазорах смесительного элемента при гомогенизации полимер-каучуковых композиций, разработан алгоритм и программа расчета математической модели процесса.

Разработаны рекомендации по проектированию новых конструкций смесительных элементов.

ПОЛИМЕР-КАУЧУКОВЫЕ КОМПОЗИЦИИ, ПОЛИЭТИЛЕН, СИЛИКОНОВЫЙ КАУЧУК, ЭКСТРУЗИЯ, СМЕШЕНИЕ, ЭЛЕМЕНТ МЕДДОКА, ЭКСТРУДЕР

ABSTRACT

UDC 678

Magister dissertation on the theme: «The process of extrusion polymer–rubber mixtures» / NTUU «IGOR SIKORSKY KPI»; Leader Y. H. Dvoinos. – K., 2018. – 165 p.: 39 ill. – Performer Y. G. Gotskiy. – Bibliog.: 223 p.

Object of research: the process of mixing polyethylene-rubber compositions in a single-screw extruder.

Subject of research: the influence of geometrical dimensions of the screw mixing elements on the process of mixing polyethylene-rubber compositions in a single-screw extruder.

The purpose of the dissertation is to establish the quality of mixing from the geometric dimensions of the mixing element to improve the effectiveness of the process of mixing polymer-rubber composite materials.

Given the information on the origin of the problem of mixing polymer-rubber compositions and the analysis of experimental research methods.

Formulated the physical model of the process of homogenization in the conditions of the deformation of the shift of the non-uniform mixture of rubber with polyethylene in working clearances.

Formulated the mathematical model of the melt flow in the working clearances of the mixing element during homogenization of polymer-rubber compositions, developed the algorithm and the program for calculating the mathematical model of the process.

Developed recommendations for designing new constructions of mixing elements.

POLYMER–RUBBER COMPOSITIONS, POLYETHYLENE, SILICONE RUBBER, EXTRUSION, MIXING, MADDOCK MIXING ELEMENT, EXTRUDER

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	13
ВСТУП	15
1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	20
1.1 Використання полімерних композиційних матеріалів.....	20
1.2 Теоретичні дослідження проблеми екструзії композицій	25
1.3 Основні види змішування компонентів суміші	29
1.4 Особливості вибору обладнання для переробки композицій на основі полімерів та силіконового каучуку	32
1.5 Вплив геометричних розмірів черв'яка на якість проведення процесу екструзії поліетилену та каучуку.....	37
1.6 Конструкції найбільш широко застосованих змішувальних елементів одночерв'ячних екструдерів	42
1.7 Висновки	46
1.8 Мета та задачі досліджень.....	47
2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДИСПЕРГУЮЧОГО ЗМІШУВАННЯ ПРИ ЕКСТРУЗІЇ ПОЛІМЕР–КАУЧУКОВИХ СУМІШЕЙ	49
2.1 Обґрунтування моделі процесу екструзії полімер – каучукової композиції в змішувальному елементі.....	49
2.2 Фізична модель процесу диспергуючого змішування полімер – каучукових композицій	56
2.3 Математична модель процесу течії розплаву в каналах і зазорах змішувального елементу	61
2.4 Методика розв'язання математичної моделі процесу течії розплаву в робочих зазорах змішувального елементу	72
2.5 Висновки	79
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ	81
3.1 Дослідження реологічних параметрів неньютонівських рідин методом	

капілярної віскозиметрії	81
3.2 Опис експериментальної установки.....	82
3.3 Методика визначення реологічних параметрів розплаву	84
3.4 Результати експерименту	86
3.5 Дослідження якості змішування	89
3.6 Віртуальне дослідження	92
3.7 Перевірка адекватності математичної моделі	97
3.8 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	100
3.8.1 Повітря робочої зони	100
3.8.2 Небезпека ураження електричним струмом.....	104
3.8.3 Небезпека впливу елементів устаткування, нагрітого до високих температур	106
3.8.4 Виробничий шум та вібрації	106
3.8.5 Пожежна безпека та надзвичайні ситуації	112
3.9 Висновки	115
4. ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	117
4.1 Рекомендації щодо проектування конструкцій змішувальних елементів ...	117
4.2 Опис технологічного процесу.....	120
4.3 Технічне рішення нової конструкції	122
4.4 Висновки	125
5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ	126
5.1 Опис ідеї проекту	126
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	129
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	132
5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	143
5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	145
5.6 Висновки	153
ВИСНОВКИ.....	154

ВЫВОДЫ	156
CONCLUSIONS	158
ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	160
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	162
Додаток А Програма розрахунку математичної моделі процесу течії розплаву в робочих зазорах змішувального елемента	166
Додаток Б Програма розрахунку реологічних властивостей поліетилен – каучукової композиції	181
Додаток В Розрахунок похибок експериментальних даних	190
Додаток Г Публікації	197

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

Умовні позначення:

ПКМ – полімерні композиційні матеріали;

ПЕНТ – поліетилен низького тиску (високої густини);

ЗПТ – захисна поліетиленова труба;

ПТР – показник текучості розплаву;

ДС – дисперсне середовище;

ДФ – диспергована фаза;

Фізичні параметри:

τ – напруження зсуву, Па;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с;

$\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с⁻¹;

γ – деформація зсуву;

n – ступень Неньютонівської поведінки розплаву;

K – коефіцієнт консистентності, Па·с ^{n} ;

ρ – густина, кг/м³;

C_p – питома теплоємність, Дж/(кг·°С);

l – довжина зазорів, м;

L – довжина, м;

h – глибина зазорів, м;

H – глибина каналів, м;

d – діаметр, м;

δ – зазор між циліндром корпусу та шнеком, м;

R – радіус, м;

D – діаметр, м;

B – ширина зазору змішувального елемента, м;

S – ширина каналу змішувального елементу, м;
 V – об'єм апарату, м³;
 W_x, W_y, W_z – проекції швидкостей руху розплаву композиції у каналі змішувальної секції в координатних осях x, y, z за граничних умов;
 n – частота обертання, об/хв;
 W – лінійна швидкість, м/с;
 G – масова продуктивність, кг/с;
 Q – витрати, м³/с;
 q – енергія дисипації, Вт;
 ΔN_d – потужність дисипації, Вт;
 ΔT – перегрів розплаву, °С;
 ΔP – перепад тиску, МПа;
 dx, dy, dz – розміри елементарного об'єму рідини, м;
 $\partial P / \partial x$ – градієнт тиску, Н/м³;
 $\partial \tau / \partial y$ – градієнт швидкості зсуву, Па/м;
 t – час, с;
 Γ – накопичена деформація зсуву;
 I_2 – критерій змішування.

ВСТУП

Актуальність теми

Переробка та створення нових композицій на основі полімерів є важливим напрямком розвитку промисловості України. Адже ці матеріали отримують кращі експлуатаційні та механічні характеристики, такі як еластичність, удароміцність та морозостійкість. Також великою перевагою полімерних матеріалів над іншими традиційними матеріалами є можливість виробництва міцних, зносостійких та бюджетних матеріалів, які не поступаються в якості та міцності металам та іншим традиційним матеріалам. Найбільш широко застосованими полімерними композиційними матеріалами на основі каучуку є композиції з поліетиленом, поліпропіленом та полівінілхлоридом.

Композиція на основі високомолекулярного поліетилену та 10 % кремній – органічного каучуку утворює матеріал з новими експлуатаційними характеристиками, а саме низьким коефіцієнтом ковзання. Даний композиційний матеріал може використовуватись при виготовленні антифрикційного покриття внутрішньої поверхні захисних поліетиленових труб оптоволоконних мереж та деталей, що контактують з рухомими елементами та мають вимоги до антифрикційних властивостей.

При переробці таких композицій найбільш критичним процесами є диспергування та перемішування наповнювачів, таких як пластифікатори, стабілізатори, барвники та інші добавки, що надають специфічні властивості отриманій композиції.

Сучасне устаткування для переробки відомих композиційних полімер–каучукових матеріалів є двочерв'ячним. Внаслідок того, що вартість даного обладнання є вищою в порівнянні з одночерв'ячним, а ефективність змішування останнього можна підвищити шляхом встановлення та модернізації змішувального елемента. Тому модернізація та розробка нового одночерв'ячного обладнання для переробки полімерних композицій є важливим, а питання

дослідження процесу диспергування та перемішування гетерофазних систем в змішувальному елементі є актуальним.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є встановлення закономірностей основних параметрів якості перемішування – швидкість зсуву та час перебування в зазорі змішувального елемента, та вплив даних параметрів на ефективність проведення процесу змішування неоднорідної системи поліетилену з каучуком у змішувальному елементі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Магістерська робота виконана згідно з тематичним планом кафедри МАХНВ НТУУ «КПІ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО» та за напрямом підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр» за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізація «Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та нафтопереробних виробництв».

Об'єкт дослідження: процес змішування поліетилен-каучукових композицій в одночерв'ячному екструдері.

Предмет дослідження: вплив геометричних розмірів змішувальних елементів черв'яка на процес перемішування поліетилен-каучукових композицій в одночерв'ячному екструдері.

Методи досліджень: фізико–математичне моделювання процесу перемішування каучуку з високомолекулярним поліетиленом в робочому зазорі перемішуючої насадки при виробництві гранул композиції з застосуванням теоретичних та експериментальних методів досліджень.

Завдання дослідження. Відповідно до поставленої мети сформульовані задачі дослідження:

1. Визначити параметри, що впливають на процес перемішування при екструзії суміші силікону і високомолекулярного поліетилену;
2. Дослідити вплив індексу перемішування на якість виготовленої

продукції та розробити методику визначення індексу перемішування готової композиції;

3. Сформулювати та проаналізувати фізичну модель процесу екструзії композиції у одночерв'ячному екструдері з перемішуючою насадкою;

5. Сформулювати та вирішити математичну модель течії розплаву неоднорідної суміші у робочих каналах екструдера з перемішуючою насадкою;

6. Провести експериментальні дослідження;

7. Перевірити адекватність математичної моделі, скорегувати отримані результати та зробити висновки.

Наукова новизна одержаних результатів.

- Сформульовано фізичну модель процесу перемішування в умовах деформації зсуву неоднорідної суміші силіконового каучуку з високомолекулярним поліетиленом в змішувальному елементі та визначені основні параметри для проведення ефективного процесу;

- Експериментально визначено реологічні параметри течії високов'язкого розплаву композиції поліетилену та каучуку, що має неньютонівський характер та використано отримані результати для розв'язання математичної моделі процесу;

- Визначено вплив основних параметрів проведення процесу екструзії поліетилен–каучукової композиції, а саме геометричних розмірів змішувального елемента (довжина каналів, глибини робочих зазорів), швидкості обертання черв'яка та температури в змішувальному елементі;

- Обґрунтовано основні визначальні параметри, що впливають на якість отриманої гранули композиції поліетилену та каучуку;

- Отримано нові теоретичні залежності індексу перемішування сумішей з різномірними реологічними параметрами від накопиченої деформації зсуву і розроблено програми розрахунку визначення основних реологічних параметрів течії неньютонівського розплаву полімеру та програму розрахунку

профілів швидкостей зсуву в робочому зазорі;

- Наведено рекомендації щодо проектування нових конструкцій змішувальних елементів в залежності від перегріву розплаву, перепаду тиску та накопиченої деформації зсуву від основних геометричних розмірів змішувального елемента.

Практичне значення одержаних результатів.

- Сформульовані конструкційні особливості конструкції змішувального елемента;
- Розроблено програми розрахунку епюр швидкостей зсуву, напружень зсуву та визначення перепадів тиску та температур в змішувальному елементі;
- Встановлено параметри, що найбільше впливають на процес диспергуючого перемішування агломератів диспергованої фази в дисперсному середовищі;
- Розроблено спосіб та конструкцію запобігання термічній деструкції розплаву шляхом охолодження водою внутрішньої поверхні змішувального елемента в зоні гомогенізації одночерв'ячного екструдера і спосіб інтенсифікації процесу дистрибутивного змішування в змішувальному елементі (заявки на патент України на корисну модель № u 2017 09630 МПК В29С 47/80, В29С 47/36, В29С 47/88 та № u 2018 02087 МПК В29С 47/60, В30В 11/24).

Особистий внесок здобувача.

Проведено аналіз джерел літератури в галузі переробки полімерних композиційних матеріалів, наявних фізичних і математичних моделей процесу диспергуючого перемішування та їх адаптація згідно особливостей проведення процесу екструзії полімер–каучукової композиції; розроблено методики розв'язання запропонованої математичної моделі та перевірки її адекватності; проведено експериментальні дослідження течії неньютонівського розплаву полімеру з наступним розрахунком програмою степеню неньютонівської поведінки та коефіцієнту консистентності; сформульовано основні положення та

зроблено висновки і розроблено рекомендації для проведення енергоефективного процесу екструзії полімер–каучукових композицій; розроблено нові конструкції змішувальних елементів.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення дисертаційної роботи були опубліковані у двох статтях в міжнародному науковому журналі та в двох позауніверситетських міжнародних конференціях ОНАХТ, доповідались на XI міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (Київ, Україна, 2016), XII міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (Київ, Україна, 2017), XIII міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (Київ, Україна, 2017), XIV міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (Київ, Україна, 2018).

Публікації.

Основний зміст дисертаційної роботи опубліковано в 8 друкованих працях, у тому числі: двох статтях у наукових фахових виданнях України, 6 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 2 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи.

Дисертація складається з чотирьох розділів, загальних висновків, переліку посилань, та додатків. Повний обсяг дисертації становить 223 сторінок, 43 рисунок, 30 таблиць і списку літературних джерел з 31 найменувань (на 4 сторінках), перелік умовних позначень на 3 сторінках, додатки складають 58 сторінок.

1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Використання полімерних композиційних матеріалів

Великий інтерес до пластичних мас викликаний не тільки їх технічно вигідними властивостями (низька питома густина, висока хімічна стійкість, наявність високоеластичного стану тощо). Виготовлення виробів з пластмас відзначається низькою трудомісткістю, енергомісткістю, доступністю вихідної сировини. На виготовлення пластмасового виробу потрібно витратити в $2,5 \div 4$ рази менше праці, ніж на виготовлення аналогічного виробу з металу, і при цьому споживається в $3 \div 5$ разів менше енергії [1].

Впровадження в народному господарстві пластмас і композиційних полімерних матеріалів відзначається високою економічною ефективністю. Коло створених і перспективних композиційних матеріалів надзвичайно широке в зв'язку з можливістю варіювати компоненти, структуру, технологію [2].

Композитами називають матеріали, що складаються з двох або більше компонентів, які малорозчинні чи не розчинні один в одному і мають різnorідні властивості [2]. Компоненти, що входять в склад поділяються на зв'язувальний компонент або матриця та наповнювачів, що надають експлуатаційні властивості новому матеріалу, а саме міцності, еластичності тощо. Отже кожен компонент ПКМ має власні функції і розподілені виразною границею розподілу. Матриця забезпечує пластичність, наповнювач міцність.

Виготовлення виробів з полімерних композицій проводять за такими основними методами:

- Екструзія;
- Формування волокна;
- Каландрування;
- Видування;

- Лиття під тиском;
- Пресування.

Найбільш широкого застосування набув метод екструзії, ним одержують основну масу погонажних виробів: труби, плівки, листи, профілі.

Вальцюванням і каландруванням отримують значний асортимент плівок (плівки загального призначення, морозостійкі, багатошарові, комбіновані тощо) і рулонні матеріали [1]. Литтям під тиском переважно застосовується для виробництва деталей з попередньо перероблених гранул полімеру методом екструзії в готовий виріб.

Полімерні композити застосовуються в будівельній, авіабудівній, автомобілебудівній, приладобудівній промисловості. В даний час ПКМ широко застосовуються і область їх застосування постійно збільшується. ПКМ поступово витісняють класичні конструктивні матеріали, такі як дерево, сталь та металеві сплави [1, с. 11].

В будівельній промисловості композиційні матеріали на основі поліетилену з скловолокном, базальтовим волокном та багатьма іншими наповнювачами застосовуються для виробництва профілів та корпусів деталей, склопластикові вікна та інші вироби, які повинні мати високу стійкість до зовнішнього навантаження.

В машинобудівній, авіабудівній та суміжних галузях промисловості ПКМ застосовують як матеріал для виготовлення фюзеляжів, корпусів акумуляторів, бамперів автомобілів та багатьох інших виробів та деталей.

Найбільш широко застосовуваними композиціями синтетичного кремній органічного каучуку та термопластів є системи поліетилену, поліпропілену та полівінілхлориду з каучуком.

Композиція високомолекулярного поліетилену ПЕНТ з кремній органічним каучуком застосовується при виготовленні антифрикційного покриття внутрішнього поверхні захисних поліетиленових труб оптоволоконних

мереж та деталей, що контактують з рухомими елементами та для деталей чи механізмів, що труться. Крім цього застосування даної композиції є можливим для виробництва багатьох інших виробів.

Композицію на основі поліпропілену та силіконового каучуку застосовують для виробництва корпусів від акумуляторів, профілів та корпусів бамперів автомобілів [6].

Основною сферою використання композиції поліетилену з каучуком є інформаційна. А саме для виробництва внутрішнього антифрикційного покриття телекомунікаційний оптоволоконних мереж зв'язку.

Сучасний розвиток інформаційних технологій спрямовано на зменшення вартості та енергозатрат прокладання, мінімізації кількості з'єднань телекомунікаційних оптоволоконних мереж.

Телекомунікаційний оптоволоконний кабель, найчастіше прокладається в канал (захисна труба з поліетилену), який закопано в ґрунт. Це забезпечує надійний захист кабелю від зовнішніх чинників, таких як несприятливі погодні явища, господарська діяльність людини тощо.

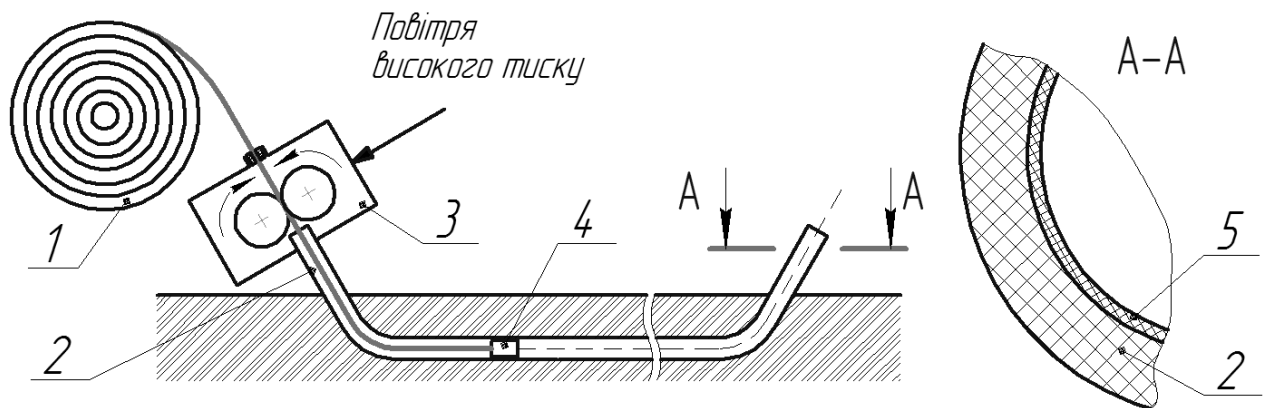
Одним з найсучасніших способів прокладки є пневматична, – на вході до захисної труби встановлюється пристрій, який заштовхує кабель всередину труби механічно, та пневматично (на кінці закріплено герметизуючий пристрій, «парашут»). Основними технічними перевагами методу пневматичної прокладки є відсутність зосереджених тягнучих зусиль, що діють на оптоволоконний кабель в процесі його просування по каналу, зведення до мінімуму вимог до працюючих на стиск зміцнювальних покриттів окремих світловодів і їх збірок, економія дефіцитної площі кабельних каналів і можливість заміни розгалужувальних муфт на розгалужувальні муфти трубчатих каналів [4].

Каучук з силікону марки СКТН [1] Запорізького державного підприємства "Кремнійполімер" разом з МФСН-В (затверджувач і стабілізатор) та поліетиленом утворюють композицію з антифрикційними властивостями, які

дозволяють використати новий матеріал як антифрикційне покриття внутрішньої поверхні захисних труб з поліетилену для монтажу оптоволоконних кабелів зв'язку. Перевага силіконових добавок у стабільності властивостей, – полімеризований високомолекулярний силіконовий каучук не розчиняється у поліетилені, і відповідно, не мігрує в середину стінки труби. Крім того, температура менше впливає на коефіцієнт тертя.

Традиційно, технологія екструзії таких композицій передбачає створення гранульованого концентрату, який у екструдері внутрішнього шару перемішується з основним матеріалом. Відповідно, концентрат містить значно більшу концентрацію адитивів.

Схема пневматичної укладки оптоволоконного кабелю в ґрунт наведена на рисунку 1.1.



1 – бухта оптоволоконного кабелю; 2 – захисна поліетиленова труба;
3 – пристрій; 4 – парашут; 5 – антифрикційний шар
Рисунок 1.1 – Принципова схема прокладки оптоволоконного кабелю методом пневматичної укладки в ґрунт

Відповідно до термінів ДСТУ 4549-1:2006 "Кабельний трубопровід – складова частина закритої системи електропроводки з кільцевим поперечним перерізом, призначена для розміщення ізольованих проводів і/або кабелів у електричних або телекомунікаційних установках, через яку їх протягують".

Провідний галузевий інститут України ПрАТ Діпрозв'язок розробив галузеві будівельні норми у сфері телекомунікацій: ГБН В.2.2-34620942-002:2015 «Лінійно-кабельні споруди телекомунікацій. Проектування». Відповідно до норми "прокладання кабельного трубопроводу безтраншейним способом, рисунок 1.2, із застосуванням кабелеукладачів дозволяється для ґрунтів 1–3 груп, водні перешкоди, болота".

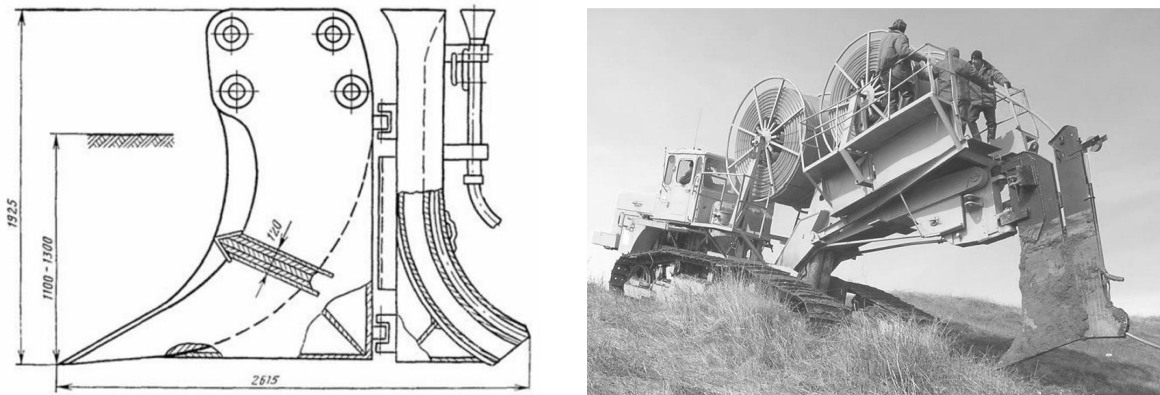


Рисунок 1.2 – Ніж кабель – укладальний типу НКП-1Д

Основні вимоги до захисної поліетиленової труби (далі ЗПТ): розміри труби, механічні параметри. Номінальний розмір ЗПТ відповідає зовнішньому розміру труби (від 8 мм до 50 мм), також регламентується внутрішній діаметр. Основні механічні параметри ЗПТ відповідають вимогам до експлуатації: стійкість до стискання (3 типи) забезпечує збереження круглої форми при навантаженні ґрунтом; спротив удару (2 групи) визначає можливість безтраншейної укладки, під час якої на трубу діють ударні навантаження [3].

У підготовлені канали кабелі прокладаються як методом задувки, так і методом затягування ручним способом. Відповідно до ГБН В.2.2-34620942-002:2015 прокладання захисної поліетиленової трубки діаметром від 8 мм до 50 мм з наступною задувкою в неї до 25 поліетиленових мікротрубок діаметром від 3 мм до 12 мм для прокладання мікрокабелів. Задування кабелів або пневмопрокладка в раніше прокладену захисну поліетиленову трубку високої

щільності - це метод, який дозволяє прокладати кабель у трубку, використовуючи силу стисненого повітря. Задувати можна не тільки оптичні, але і металеві кабелі та мікротрубки. Для задувки використовуються труби з внутрішнім покриттям спеціальною плівкою або з насічкою внутрішньої поверхні. Коефіцієнт тертя внутрішньої поверхні повинен бути менше ніж 0,1. Діаметр кабелю, що вводиться, повинен бути приблизно в 2 рази менше від внутрішнього діаметра трубки.

Полімерні композиційні матеріали широко застосовуються в промисловості, як бюджетний, міцний та зносостійкий матеріал для виготовлення виробів побутового призначення, автомобілів, літаків і побутової техніки.

1.2 Теоретичні дослідження проблеми екструзії композицій

Основною відмінністю композиційних матеріалів над звичайними гомогенними матеріалами (металами та неметалами) є вміст двох чи більше взаємо— нерозчинних компонентів. До таких матеріалів відносяться більшість полімерних матеріалів, які ще називають пластмаси.

Пластичні маси – матеріали, що одержують на основі природних і синтетичних полімерів, а також цілого ряду додатків різного призначення, які внаслідок своєї пластичності під дією теплоти і тиску можуть набувати і зберігати у виробі надану їм форму. Отже, пластмаси – складні композиції різноманітних хімічних речовин, основою яких є полімер або суміш полімерів [1, с. 11].

Наповнювачі вводять для покращення механічних властивостей пластмас, зменшення усадки, надання полімерному матеріалу інших цінних експлуатаційних властивостей, а також для зниження вартості виробів. Активні наповнювачі значно покращують експлуатаційні властивості полімерних

матеріалів, а інертні, не змінюючи практично властивостей пластмас, зменшують їх вартість. Наповнювачами можуть бути тверді, рідкі та газоподібні речовини неорганічної та органічної природи, які рівномірно розподіляються в об'ємі композиції і мають чітку межу поділу з полімером [1, с. 11].

Основною проблемою виробництва високоякісних полімерних композиційних матеріалів з заданими технічними характеристиками, включаючи армування та наповнення пластмас є процес екструзії полімеру з наповнювачами, стабілізаторами, пластифікаторами та іншими добавками, що надають ці властивості новому матеріалу. Процес екструзії таких сумішей в основному залежить від вибору екструзійного обладнання.

Нині відомо кілька десятків основних і спеціалізованих методів виготовлення виробів з пластмас. Кожен метод – це шлях здійснення технології виготовлення виробу з полімерного матеріалу, який визначається кількома факторами. Існує два класи полімерів; термопласти і реактопласти. Одержання виробів із реактопластів (фіксування їх форми) супроводжується фізичними і хімічними процесами (реакціями утворення тривимірного полімеру – затвердінням). У результаті реактопласт переходить у нерозчинний стан, тобто він не плавиться. Переробка ж термопластів супроводжується лише фізичними процесами [1, с. 14].

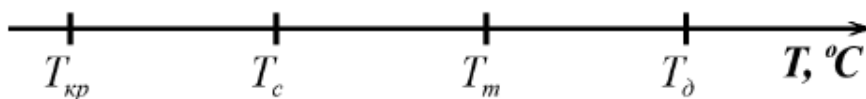
При переробці полімерів та їх композицій використовуються різноманітні типи компонентів, які знаходяться в різних фізичних станах [4]. А саме фізичний стан полімерної матриці (тверда фаза, розплав чи розчин) і наповнювача (тверді тіла, рідини та гази). Фізичний стан кожного компонента суміші визначає вибір обладнання, та ділянки де відбувається їх змішування. До початку основної технологічної операції змішування визначається не тільки їх фізичним станом, а також їх фізичними перетвореннями, які проходять в цьому процесі.

В залежності від відношення температури плавлення полімерної матриці і температури плавлення, кипіння чи деструкції наповнювача можливий перехід

наповнювача з твердої фази в рідку та з рідкої чи твердої фази в газоподібну.

Отже, необхідною умовою переробки є визначеність температурних інтервалів вищезгаданих станів для матриці та наповнювача. Всі відомі полімери можна характеризувати за такими температурами фізичних переходів, які наведені на рисунку 1.3 [1].

До основних фізико-хімічних властивостей переробки полімерних композицій належать тиск, температура та швидкість зсуву, яка виникає при течії розплаву, внаслідок того, що розплав полімеру є «неньютонівською» рідиною. Тобто розплав полімеру є псевдопластичною рідиною, для якої в'язкість розплаву зменшується зі збільшенням швидкості зсуву.



$T_{кр}$ – температура крихкості; T_c – температура склування; T_m – температура текучості(топлення); T_d – температура деструкції; $T_{кр} - T_c$ – склоподібний стан;

$T_c - T_m$ – вискоеластичний стан; $T_m - T_d$ – в'язкотекучий стан.

Рисунок 1.3 – Схема температурних фізичних переходів полімерів [1]

На якість змішування композицій впливають вид наповнювача, його адгезія, розчинність, агрегатний стан вводу та інші фізико-хімічні властивості.

Наповнювачами можуть бути тверді, рідкі та газоподібні речовини неорганічної та органічної природи, які рівномірно розподіляються в об'ємі композиції і мають чітку межу поділу з полімером.

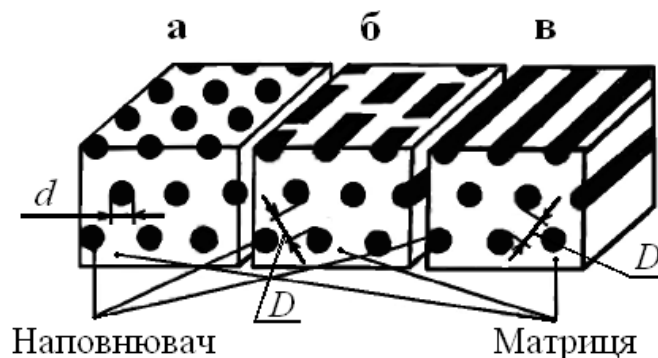
Тверді наповнювачі поділяють на порошкоподібні, зернисті, волокнисті та листові [1]. Також розрізняють наповнювачі по складу, формі розмірам частинок. За геометричною формою наповнювача полімерні композиційні матеріали поділяють на дві групи: 1) із зернистим наповнювачем і 2) із

ВОЛОКНИСТИМ НАПОВНЮВАЧЕМ.

Зернисті наповнювачі мають близькі розміри довжини l і діаметру d : ($l/d \approx 1$). У волокнистих наповнювачів їх довжина значно переважає діаметр частинки: $l/d \gg 1$.

Зернисті наповнювачі поділяють на дисперсні, що мають розмір зерен $d \leq 0,1$ мкм та порошкові, що мають більше 25 % з розміром зерен $d \geq 1$ мкм.

Полімерні композитні матеріали з волокнистим наповнювачем називаються армованими пластиками. В свою чергу волокнисті наповнювачі поділяються на дискретні та неперервні волокна.



а – зернистий наповнювач (дисперсні, порошкоподібні ; б – дискретний волокнистий наповнювач; в – неперервний волокнистий наповнювач.

Рисунок 1.4 – Схема структури полімерних композиційних матеріалів

Конфігурація і габарити виробів впливають на вибір методу виготовлення. Наприклад, порожні ємності одержують екструзією з подальшим роздувом, а дуже об'ємні – ротаційним формуванням [1, с. 14].

Також метод переробки полімеру визначається фізичним станом, у якому перебуває полімер в момент виготовлення виробу: склоподібному (холодне пресування, вирубка тощо), високоеластичному (термоформування), в'язкотекучому (лиття, пресування, екструзія тощо).

Пластичний кремнійорганічний каучук з силікону, який змішується з поліетиленом є дисперсною фазою в поліетилені, тобто відбувається змішування

двох неоднорідних рідин з різними реологічними характеристиками. При змішуванні таких в'язких неоднорідних систем, компоненти яких є малорозчинними чи нерозчинними один в одному змішування відбувається тільки за допомогою виникаючих деформацій зсуву в матеріалі.

1.3 Основні види змішування компонентів суміші

Змішування – процес в якому два або більше компонентів переміщуються в певному об'ємі зі зміною початкового розподілення компонентів. Оскільки при виробництві та переробці полімерів та композицій на їх основі до полімеру (матриці) додають різні наповнювачі, такі як стабілізатори, пластифікатори, барвники та інші наповнювачі. Для ефективного проведення цього процесу необхідно знати основні закономірності та параметри, що впливають на його якість.

Розрізняють змішування за видом компонентів [1, с. 18]:

- а) змішування твердих речовин з рідиною під дією механічних сил (наприклад, введення пластифікатору);
- б) змішування рідин (полімеру у в'язкотекучому стані і компонентів) під дією зовнішніх сил і молекулярної дифузії;
- в) змішування двох полімерів у в'язкотекучому стані;
- г) введення газу в полімер, котрий перебуває у в'язкотекучому стані;
- д) змішування полімеру у в'язкотекучому стані з твердими компонентами (волокнисті наповнювачі, стабілізатори, тощо).

Розрізняють два основних типи змішування: звичайне (дистрибутивне) та диспергуюче [4].

Звичайне чи дистрибутивне змішування є процесом, в результаті якого відбувається просторове розподілення частинок додаткового компонента в основному без зменшення розмірів частинок (агломератів). Звичайне

дистрибутивне змішування або механічне змішування застосовують для модифікації властивостей полімерної композиції. Наприклад полістирол, який має низьку морозостійкість, яка характеризується низьким значенням ударної в'язкості при температурі 0°C, для підвищення її до нього додають каучук та отримують ударостійкий полістирол. При виробництві антифрикційної композиції поліетилену та кремній органічного каучуку поліетилен змішують з силіконовим каучуком та іншими наповнювачами.

Полімерні композиційні матеріали містять в складі два або більше компонентів. Причому компонент суміші, концентрація якого вище за концентрації інших компонентів, називається дисперсним середовищем, компоненти суміші, розподілені в дисперсному середовищі (ДС), називають дисперговою фазою (ДФ).

В багатокомпонентних системах змішування розглядається як процес послідовного змішування кожного компоненту по черзі з раніше утвореною сумішшю, яка являє собою дисперсне середовище.

Всі компоненти даної композиції є нерозчинними один в одному, тому для отримання якісної структури матеріалу отриманих гранул, важливим є не тільки процес перерозподілу компонентів в дисперсному середовищі але і їх подрібнення, тобто диспергування.

При диспергуючому змішуванні відбувається як зменшення розмірів частинок змішуваного компоненту так і його розподіл в об'ємі основного компоненту.

Принципова схема процесів звичайного (механічного) та диспергуючого змішування наведена на рисунку 1.5.

Отже в усіх процесах диспергування спостерігається зміна розмірів фаз, тому його можна полегшити попереднім розмелюванням твердих речовин. Для ефективного диспергування, крім цього, необхідні високі напруження зсуву, відповідна адгезія середовища до фази й суттєво довший тривалість змішування в

каналі [1].

Для розробки технології диспергуючого змішування необхідно врахувати такі параметри:

- Наявність певної адгезії між компонентами;
- Стійкість компонентів до температури і механічних впливів, яка

визначає режим змішування і вибір типу обладнання.

Режим диспергування включає температуру (T), тиск (P), напруження зсуву (τ) об'єм фази (V) і час змішування (t). Безумовно, що підвищення T , P , F призведе до інтенсифікації змішування – $\tau = f(T, P, F)$ – і його ефективності, однак у цьому випадку зростає ймовірність механо- (P , F) і термо- (T) деструкції полімеру, що є небажаним. При змішуванні сипких речовин (полімер) з рідкими (пластифікатор) процес додатково ускладнюється тим, що спочатку спостерігається злипання маси, її комкування й прилипання до стінок змішувача [1, с. 19].

На якість отриманого композиційного матеріалу впливає адгезія кожного компоненту суміші відносно іншого. Адгезія – виникнення зчеплення між наповнювачем і полімером за їх взаємодії. Кількісна характеристика адгезії – питома робота адгезії $W_{ад}$. Існує зв'язок між здатністю рідини змащувати тверде тіло й роботою адгезії – термодинамічною характеристикою, пов'язаною з величиною поверхневої енергії. Адгезія полімеру до поверхні наповнювача є одним з основних факторів, які визначають фізико-механічні властивості наповнених й армованих систем [9].

При розробці технології процесу змішування та диспергування частинок кремнійорганічного каучуку, приймаємо кремнійорганічний каучук як наповнювач, а поліетилен високої щільності матрицею композиту, що армує дану композицію. Для ефективного процесу механічного змішування та диспергування необхідно досягти високих швидкостей зсуву, відповідної адгезії середовища та необхідний час перебування розплаву в змішувальному елементі.

Для цього необхідно визначити найоптимальніші параметри проведення процесу, такі як температура та тиску в робочих каналах екструдера та робочих зазорах змішувального елемента.

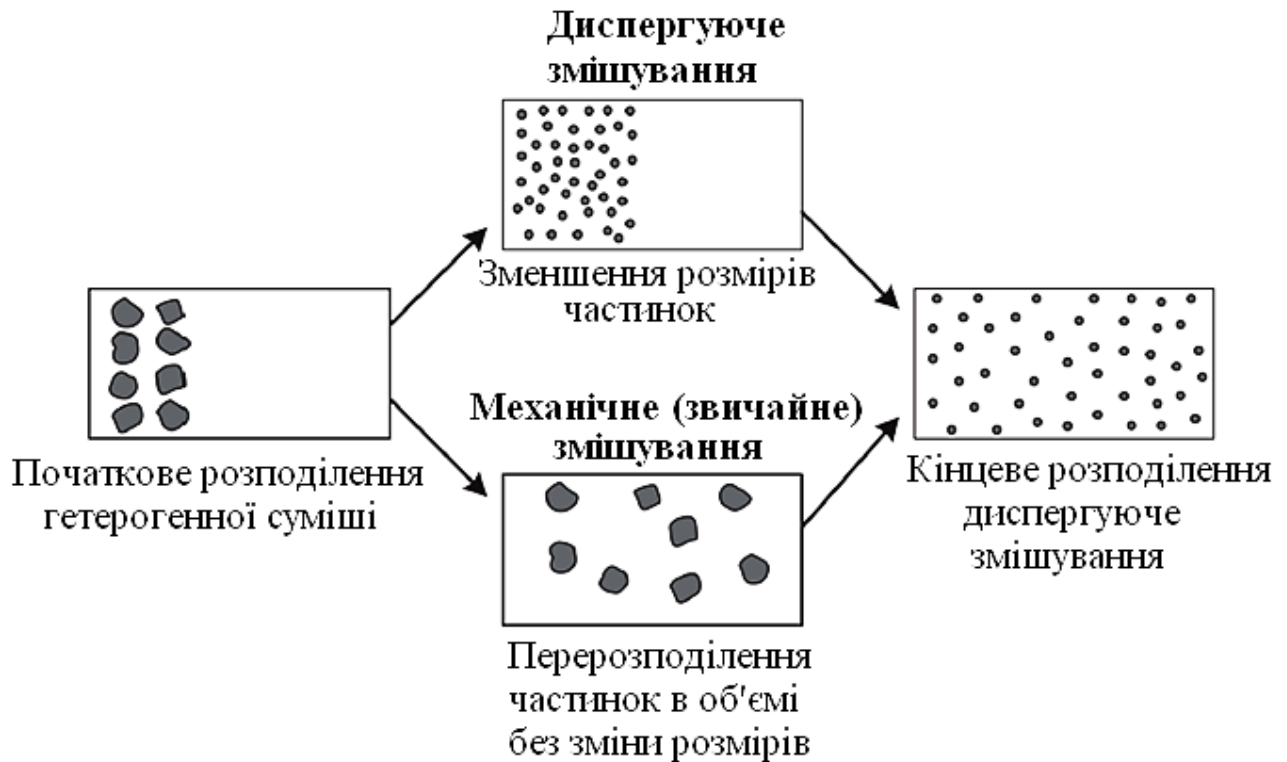


Рисунок 1.5 – Принципова схема процесів звичайного (механічного) та диспергуючого змішування [8].

1.4 Особливості вибору обладнання для переробки композицій на основі полімерів та силіконового каучуку

Основним обладнанням для переробки полімерних матеріалів та їх композицій є черв'ячні, дискові та дисково–шестеренні екструдери. В свою чергу черв'ячні екструдери поділяють за кількістю робочого елементів – шнеку. В промисловості найчастіше застосовують одночерв'ячні та двочерв'ячні екструдери.

У черв'ячних екструдерах тиск в каналі створюється за рахунок примусового, безперервного переміщення матеріалу вздовж гвинтової нарізки

шнека при його обертанні.

У дискових екструдерах тиск створюється за рахунок ефекту Вайсенберга, який полягає в зворотній до відцентрової сили, що діє на розплав до центру при обертанні диску [1].

Для екструзії використовують термопласти з високим значенням ефективної в'язкості, відповідно з низьким значенням ПТР, який, як правило, знаходиться в межах $0,3 \div 3$ г/10 хв. Можуть також використовуватись реакційно здатні олігомерні композиції та газонаповнені композиції. Використовують полімерну сировину у вигляді гранул або порошку.

Екструзія супроводжується лише фізичними процесами: деформацією полімеру, плавлення, в'язкої течії і застигання (кристалізації). Хімічні процеси, які супроводжують екструзію – термодеструкція і механодеструкція є небажаними і при правильному режимі екструзії незначно впливають на процес.

При виготовленні виробів з пластмас використовують дрібнодисперсну сировину (у вигляді гранул розміром 1,5 – 5 мм або технологічного порошку з розміром частинок 0,5 – 2 мм).

Разом з процесами змішування важливу роль відіграють процеси диспергування, що мають місце в обладнанні для отримання і переробки композиційних матеріалів. Але на даний час методи розрахунку та теоретичні основи даного процесу поки, що не дає можливість їх точного математичного опису [4].

Як було сказано раніше найбільш значний вплив на якість перемішування має обладнання на якому проводиться процес. Процес виробництва поліетилен–каучукових композицій є складним внаслідок того, що важко досягти рівномірного розподілу каучуку по всьому об'єму матеріалу, який нерозчинний в поліетилені.

Основним обладнанням виробництва концентратів є двочерв'ячний або осцилюючий екструдер – це обладнання має високі показники змішування та

диспергування.

Основним недоліком даного обладнання є його висока вартість. При його виготовленні необхідно досягти високої точності натягів та посадок робочих елементів двочерв'ячного екструдера. Також в даних екструдерах необхідно використовувати редуктори що обертають шнеки з малою відстанню між вісями. Саме тому вартість такого обладнання є більшою в порівнянні з одночерв'ячним. Двочерв'ячні екструдери найбільш широко застосовуються для змішування високов'язких, погано змішуваних сумішей, які потребують впливу високих деформацій зсуву для попередження розшарування в межах поділу фаз компонентів. Також перевагою двочерв'ячного обладнання є можливість створення більшого ступеню диспергування в порівнянні з одночерв'ячним.

При перемішуванні сумішей полімерів в незначних об'ємах вигіднішим є використання одночерв'ячного обладнання з змішувальними елементами, які є більш універсальними в порівнянні з двочерв'ячними чи дисковими екструдерами. В даному випадку перемішування можна проводити у кілька етапів, з проміжними стадіями, а саме, при змішуванні поліетилену низького тиску з силіконовим каучуком, барвниками, стабілізаторами та іншими добавками процес екструзії проводять з застосуванням двох стадій : попередня екструзія в короткому (20D) екструдері для створення гранул, які містять в собі погано розподілені та великі включення каучуку та інших наповнювачів, і остаточне змішування компонентів суміші в довгому (30D) одночерв'ячному екструдері зі змішувальним елементом.

В свою чергу одночерв'ячне екструзійне обладнання не задовольняє всі вимоги до змішування та диспергування компонентів суміші. Внаслідок чого це може призвести до виробництва бракованих виробів, втрати матеріалу та зупинки виробництва.

Найкращим шляхом вирішення цієї проблеми є покращення змішування та диспергування в одночерв'ячному екструдері завдяки застосуванню нових

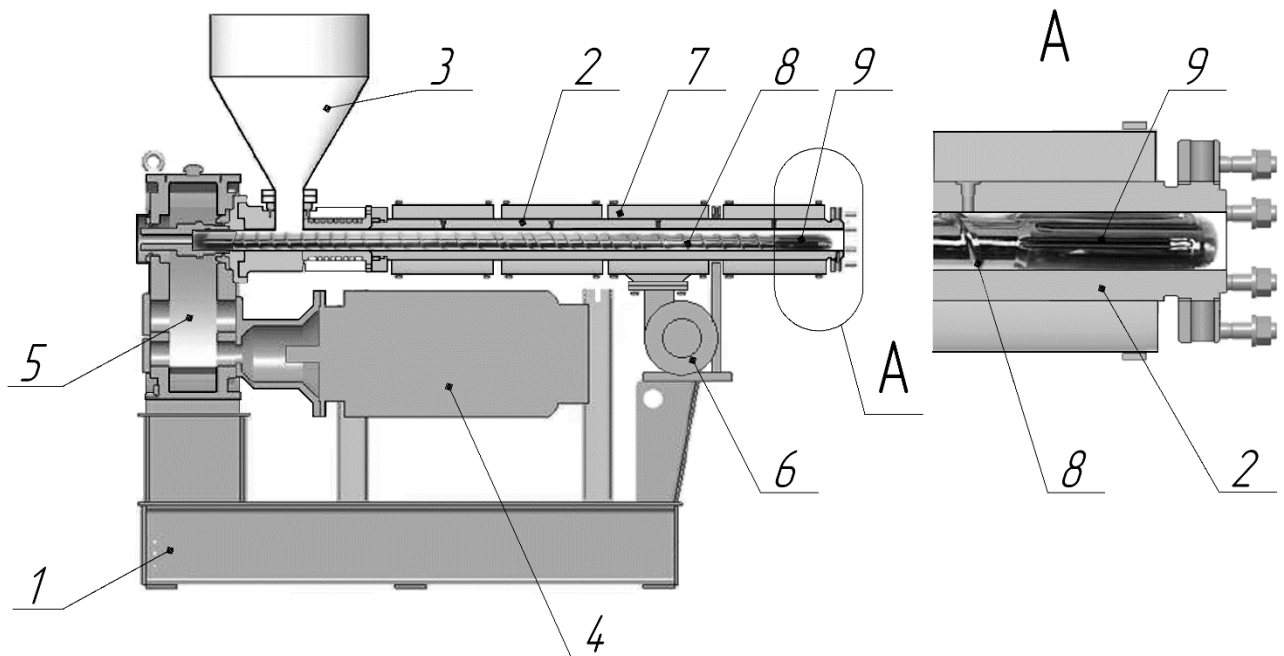
конструкції змішувальних елементів та їх комбінування з іншими. Але в цьому випадку також виникають проблеми в проектуванні конструкції змішувальних елементів, оскільки методик розрахунку геометричних параметрів та їх впливу на якість кінцевого продукту, та моделювання роботи змішувального елемента на даний момент недостатньо.

На рисунку 1.6 наведено схему одночерв'ячного екструдера модифікованого змішувальним елементом Меддока [6].

Екструдер складається з станини 1, на якій розташовано всі робочі елементи конструкції. Електродвигун 4 створює обертальний момент, який через редуктор 5 передає до черв'яка. Черв'як 8 розміщено в товстостінному корпусі 2, який складається з різьбових фланців, та циліндричної труби. В зоні завантаження екструдера знаходиться завантажувальна воронка 3, за допомогою якої відбувається завантаження сировини. Для нагріву гранул полімеру на корпусі розташовані електронагрівачі 7, та для охолодження вентилятори 6. Змішувальний елемент Меддока 9 розміщено на черв'яці в зоні гомогенізації екструдера.

Черв'ячний екструдер працює наступним чином. Через завантажувальну воронку надходить сировина в вигляді гранул чи порошку. Далі сировина дозується та надходить в гвинтову нарізку черв'яка, який обертається та створюється рух вздовж каналу екструдера. Дана зона екструдера називають зоною завантаження. Для рівномірного надходження та запобігання прилипання гранул, які починають плавитися в зоні завантаження на зовнішньому корпусі та в середині черв'яка подають охолоджувальну рідину. Гранули, що рухаються разом вздовж гвинтової нарізки шнеку в каналі екструдера, надходять до наступної зони – зони плавлення. В цій зоні відбувається розплавлення гранул полімеру, їх ущільнення та дозування. Тиск в каналі екструдера створюється за рахунок примусового, неперервного переміщення матеріалу вздовж гвинтової нарізки шнека при його обертанні (принцип м'ясорубки) [7]. Далі розплав

поліетилену та каучуку внаслідок дії тиску потрапляє в зону гомогенізації, де майже всі гранули вже знаходяться в рідкому стані. В даній зоні для покращення гомогенізації розплаву полімеру на черв'яку встановлюється змішувальний елемент Меддока.



1 – станина; 2 – корпус; 3 – завантажувальна воронка; 4 – електродвигун;
5 – редуктор; 6 – вентилятор; 7 – електронагрівач; 8 – черв'як; 9 – змішувальний
елемент

Рисунок 1.6 – Схема одночерв'ячного екструдера зі змішувальним елементом Меддока (Union Carbide).

Для ефективного проведення процесу екструзії полімер-каучукових композицій необхідно забезпечити необхідну температуру розплаву, при якій не відбудеться термічна деструкція матеріалу та відповідну швидкість обертання шнеку для забезпечення відповідної продуктивності, та безперервне завантаження сировини, для створення неперервного потоку.

Найважливішими чинниками для забезпечення якості переробленого полімеру є дотримання не тільки температур відповідно до теплофізичних

параметрів речовини, але й гідродинамічних параметрів, а саме швидкостей зсуву, та відповідно деформацій зсуву. Саме ці параметри впливають на якість змішування неоднорідної суміші полімеру.

Для ефективного проведення процесу диспергування та змішування високов'язкого розплаву полімер – каучукової композиції необхідно забезпечити необхідну температуру, внаслідок того, що процес змішування та диспергування супроводжується інтенсивними дисипативними тепловиділеннями, які викликають розігрів по всьому об'єму розплаву, що може викликати термічну деструкцію та погіршення основних показників отриманої композиції.

Саме тому важливим є регулювання температури на кожній зоні екструдера. Для цього на корпусі каналу шнека екструдера встановлюють електронагрівачі для нагріву гранул полімеру, що рухаються шнековим дозатором та вентилятори, які охолоджують розплав в разі необхідності.

1.5 Вплив геометричних розмірів черв'яка на якість проведення процесу екструзії поліетилену та каучуку

Черв'як являє собою основний робочий орган екструдера, від конструкції якого залежать більшість параметрів проведення процесу екструзії, а саме надходження сировини через завантажувальну воронку, рух сировини внаслідок обертання гвинтової лінії з подальшим нагрівом сировини, внаслідок чого перехід з твердого агрегатного стану сировини в в'язкотекучий стан. Ущільнення та проштовхування розплаву через формуючий інструмент.

Продуктивність екструдера і якість підготовки розплаву значно залежать від конструкції і геометрії основного робочого органу - шнека, конструктивні особливості якого представлені на рисунках 1.2. та 1.3. [11, 12].

Конструкцію черв'яка обирають згідно фізичних властивостей перероблюваного матеріалу, а саме від в'язкості, температури плавлення та твердіння, густини та інших реологічних та теплофізичних параметрів сировини.

Принцип роботи черв'яка або шнеку полягає в примусовому, неперервному переміщенні матеріалу вздовж гвинтової нарізки шнека при його обертанні.

Для одночерв'ячних екструдерів застосовують звичайні стандартні тризонні черв'яки зі змішувальними елементами або подовжені п'ятизонні черв'яки із зоною дегазації. Останні частіше використовуються для переробки гігроскопічних матеріалів, що потребують підсушування та видалення летких сполук. З метою покращення змішувальних властивостей черв'яка та отримання гомогенного розплаву використовують змішувальні елементи у вигляді кулачків, торпед і таке інше [14] встановлені на його виході черв'яка. Однак, це призвело до ускладнення черв'яків, зниження напірної характеристики екструдера, що є серйозною перешкодою на шляху підвищення продуктивності.

До стандартних конструкцій шнеків відносяться конструкції: з постійним кроком і змінною глибиною гвинтової лінії, з змінним кроком і постійною глибиною гвинтової лінії та зі змінним кроком та глибиною гвинтової лінії.

Конструкція більшості черв'яків для переробки полімерів та їх композицій для одночерв'ячних екструдерів складається з трьох основних зон – завантаження, перехідної зони (конічний перехід), плавлення та гомогенізації. Кожна зона черв'яка екструдера має свої конструктивні особливості, а саме для зони завантаження глибину гвинтової нарізки виконують більшою ніж в зоні плавлення та гомогенізації. До основних шнеків для переробки поліетилену, поліпропілену, полівінілхлориду та багатьох інших полімерних матеріалів відносять: дозуючий (стандартний), змішувальний шнек Меддока та бар'єрний шнек. Внаслідок того, що конструкцію шнеку виконують з різними глибинами нарізки в зоні завантаження та гомогенізації, конструкція шнеків одночерв'ячних

екструдерів містить перехідну зону, де відбувається плавлення гранул, що надходять з зони завантаження. Перехідна зона (зона ущільнення) виконується звичайний конічний (Conical core screw), стандартний шнек з конічною зоною (Standard metering screw), коротка конічна зона (Short metering screw). Для переробки гігроскопічних та полімерів, що виділяють леткі сполуки застосовують черв'яки з зоною дегазації, де відбувається виділення летких газів. Конструкція шнеку з зоною дегазації (two-stage venting screw), зона дегазації являє собою ділянку на черв'яку з більшою глибиною нарізки та вентиляційним отвором. Більшість конструкцій шнеків можуть містити перемішуючу секцію або може бути без неї (рисунок 1.8).

В деяких випадках екструдери містять декілька зон завантаження додаткових компонентів, які зазвичай подаються в рідкому або твердому стані.

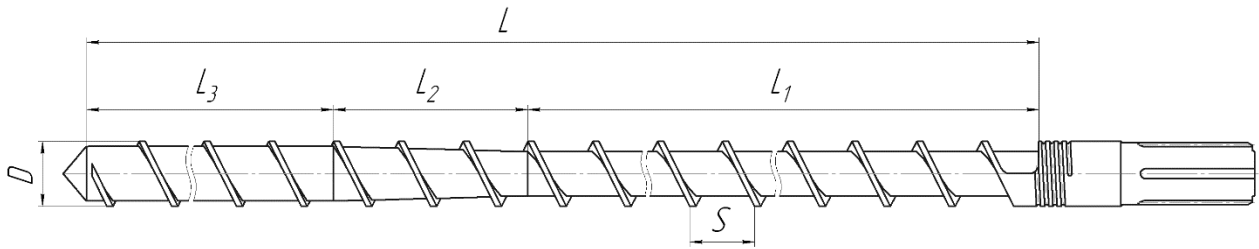
Такі конструкції використовують у випадку, якщо стандартна конструкція шнеку не забезпечує вимоги до переробки певного матеріалу. Існують конструкції з подвійними витками (бар'єрні витки), які зазвичай застосовуються для переробки резини та композицій з волокнистими наповнювачами.

Для переробки поліетилену, поліпропілену, полівінілхлориду та багатьох інших полімерів зазвичай застосовуються шнеки з постійним кроком гвинтової лінії та змінною глибиною гвинтового каналу.

Основними геометричними параметрами черв'яка для переробки полімерів є крок гвинтової лінії, глибина гвинтового каналу, довжина зон завантаження, плавлення та гомогенізації.

Стандартний шнек для дозування, тобто одновитковий, з постійним кроком може бути змінений у своїй конструкції, змінюючи одну з наступних характеристик: співвідношення L / D , коефіцієнт відношення компресії глибини каналу, профіль і кут спіралі [5].

Основні геометричні параметри шнеку наведено на рисунку 1.7.



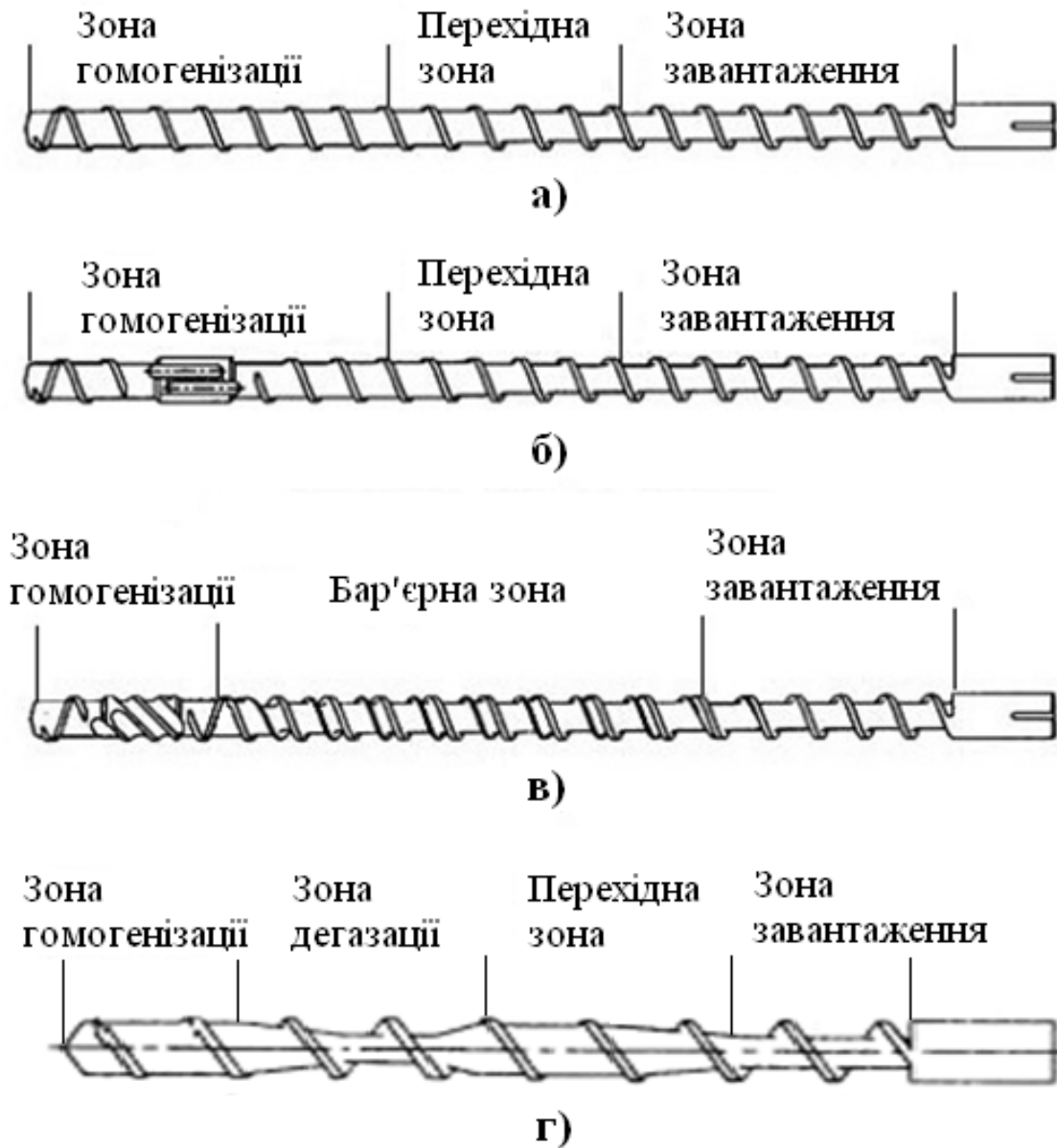
L – загальна довжина гвинтової частини шнеку, м; L_1 – довжина завантажувальної частини, м; L_2 – довжина конічного переходу (зона компресії), м; L_3 – довжина зони плавлення та гомогенізації, м; D – зовнішній діаметр шнеку, м; S – крок шнека, м.

Рисунок 1.7 – Основні геометричні розміри стандартного тризонного шнеку

Геометричні розміри шнеку є найважливішими параметрами проведення процесу екструзії полімерів та їх композицій, ефективність проведення процесу екструзії неоднорідних сумішей полімерів в основному залежить від довжини шнеку, глибини нарізки гвинтової лінії та кроку черв'яка. Для переробки поліетилену, поліпропілену та інших полімерів в основному застосовуються черв'яки з величинами відношення довжини до діаметру $L/D = 20 - 30$, при цьому екструдери, які застосовуються для переробки полімерів, що містять летючі речовини можуть досягати параметру відношення довжини до діаметру до 40 та більше [10, 12, 13, 14].

Таким чином черв'як можна розділити на наступні зони: зона захвату і подачі матеріалу, зона попереднього нагріву і пластикації та зона гомогенізації. Використання такої схеми екструзії дозволило інтенсифікувати процес отримання якісного розплаву, не підвищуючи при цьому температури на виході з екструдера.

На рисунку 1.8 наведено основні конструкції черв'яків, що застосовуються для переробки полімерів.



а – дозуючий (тризонний компресійний) черв'як; б – змішувальний шнек Меддока; в – бар'єрний змішувальний шнек; г – шнек з зоною дегазації
 Рисунок 1.8 – Основні конструкції шнеків для переробки полімерів [14]

Вибір конструкції черв'яка обирають згідно реологічних властивостей перероблюваного матеріалу, та типу машини.

1.6 Конструкції найбільш широко застосованих змішувальних елементів одночерв'ячних екструдерів

Змішувальні можливості більшості шнеків є обмеженими, тому для покращення цієї характеристики шнеки модифікують шляхом встановлення змішувальних секцій.

Перед вибором конструкції змішувального елемента насамперед необхідно визначити, який вид змішування необхідно досягти звичайний механічний розподіл компонентів без їх подрібнення, або змішування з подрібненням компонентів з рівномірним розподілом в об'ємі [10, с. 488]. Як вже було зазначено в минулих розділах (розділ 1.3) розрізняють дистрибутивне та дисперсійне (диспергуюче) змішування.

Дисперсійні змішувальні елементи використовують в випадку коли необхідно подрібнити агломерати або краплини. Дане змішування є вкрай важливим для екструзії виробів з невеликим поперечним перерізом, наприклад при витяжці волокна, екструзії тонких плівок тощо. В даних конструкціях один або декілька бар'єрних витків розміщено вздовж черв'яка, таким чином щоб матеріал перетікав над бар'єрним витком. В бар'єрному зазорі матеріал піддається значним швидкостям зсуву і відповідно високим деформаціям зсуву.

Дистрибутивне змішування необхідне при змішуванні полімерів з близькими величинами в'язкості компонентів. Даний вид змішування простіше досягти ніж дисперсійне, оскільки будь який перепад швидкості призводить дистрибутивне змішування [10, с. 518].

Також вибір змішувального елемента, так само як і вибір конструкції шнеку залежить від матеріалу, який переробляється, його фізичних властивостей. Основним фізичними характеристиками матеріалу, що переробляється є в'язкість розплаву, вміст твердих наповнювачів та летких речовин тощо.

Ускладнення конструкції змішувального елемента призводить до

ускладнення його виготовлення, відповідно зростає його вартість.

Змішувальний елемент зазвичай розміщується в зонах дозування (гомогенізації), технологічно може бути проточеним безпосередньо в заготовці шнеку чи роблячи його рознімним за допомогою різбових чи шліцевих з'єднань. В випадку рознімної конструкції змішувального елемента важливим є запобігти розкручуванню чи зсуненню змішувального елемента з шнеку, для цього різбові з'єднання виконують в протилежному напрямку до навивки шнеку.

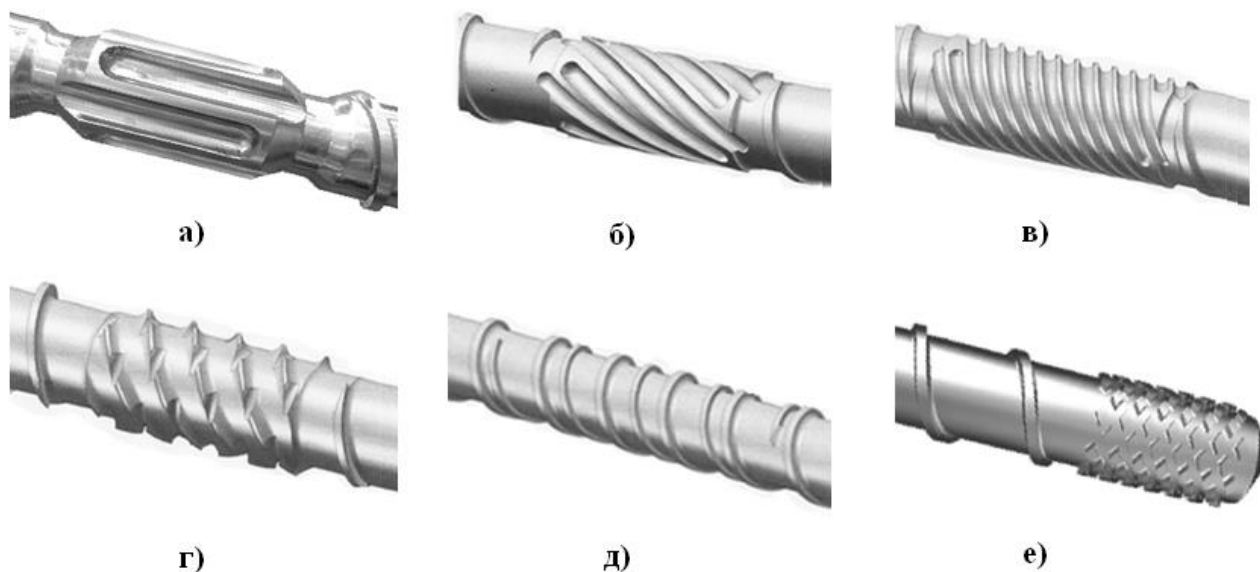
Основними параметрами, від яких залежить якість диспергуючого та дистрибутивного змішування є геометрія змішувального елемента. Основними геометричними розмірами змішувального елемента є глибина та довжина робочих зазорів та каналів, їх геометрія та якість поверхні.

До найвідоміших дисперсійних конструкцій відносяться конструкції Меддока (Union Carbide або original Maddock), який має декілька модифікацій: спіральний елемент Меддока (Spiral Maddock) та рифлену змішувальну зону Ігена (Egan).

До найбільш широко застосованих конструкцій для забезпечення дистрибутивного змішування відносять конструкції змішувальної зони Сакстона «Saxton», «ананасоподібний змішувальний елемент» (Pineapple mixing section), «шишкоподібну конструкцію» (pin mixing section), змішувальна зона Далмейджа (Dulmage mixing section) та їх модифікації. Конструкції типових перемішуючих елементів наведено на рисунку 1.9.

Стандартним змішувальним елементом вважається класична конструкція Меддока (Union carbide), що забезпечує ефективне диспергуюче змішування компонентів суміші. Перевагою даної конструкції є простота виготовлення, що дозволяє розташовувати його на різноманітних шнеках.

До найвідоміших дистрибутивних конструкцій змішувальних елементів належать конструкції Сакстона, Далмейджа та «ананасоподібна», штифтова та інші.



а – змішувальний елемент Меддока (Union Carbide); б – спіральний елемент Меддока; в – змішувальна зона Далмейджа (Dulmage mixing section); г – змішувальна зона Сакстона (Saxton mixing section); д – бар'єрна секція (barrier section); е – «ананасоподібний змішувальний елемент» (Pineapple mixing section)

Рисунок 1.9 – Конструкції відомих змішувальних елементів [10–15]

Конструкція винайдена Лероем, а результати експериментів були опубліковані Медоком є однією з найпоширеніших, оскільки дана конструкція забезпечує механічне та диспергуюче перемішування та при цьому вона є нескладною в виготовленні. Конструкцію змішувального елемента Меддока наведено на рисунку 1.10.



Рисунок 1.10 – Змішувальний елемент Меддока (Union Carbide)

Конструкція змішувального елементу – спіральний елемент Меддока, рисунок 1.11, 1.12.

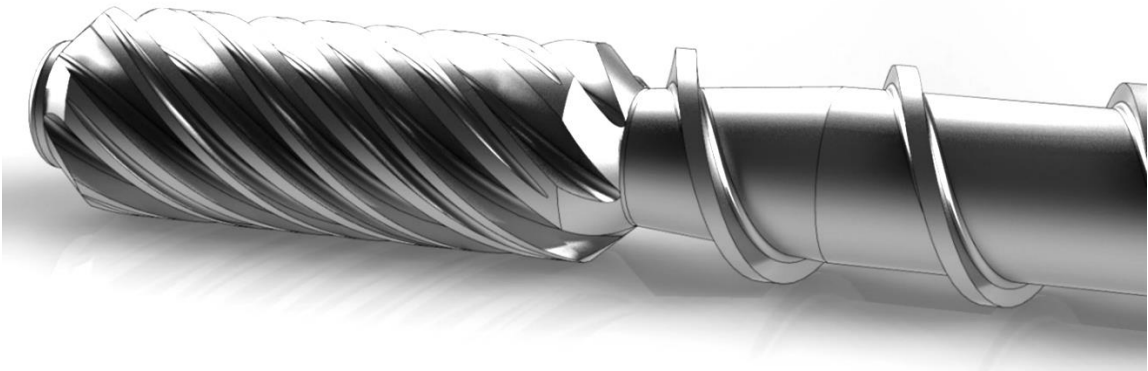
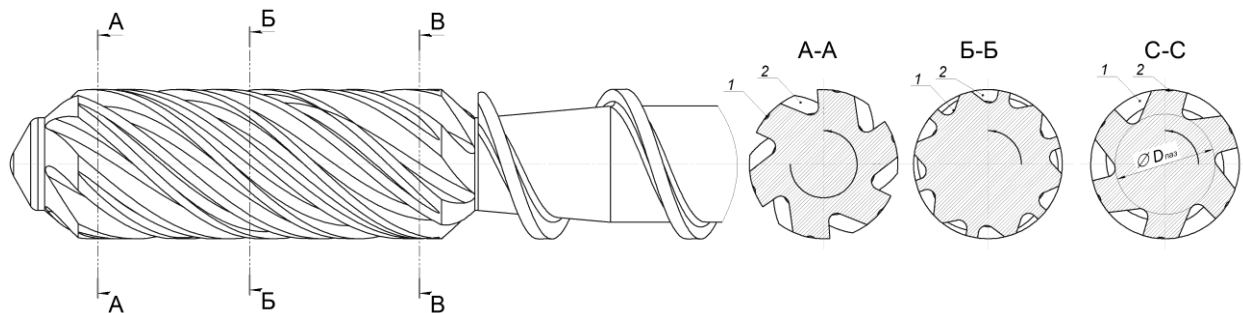


Рисунок 1.11 – Зовнішній вигляд спірального елемента Меддока

Перевагою спіральної форми елемента Меддока є випереджаюче проштовхування розплаву та більша довжина зазору, через який має переміститись полімерна композиція, що забезпечує краще диспергує змішування неоднорідної суміші поліетилену та каучуку(позиція 1 рисунку 3).



1 – канал напірний (перед робочим зазором); 2 – канал відводу (після робочого зазору);

Рисунок 1.12 – Креслення спірального елемента Меддока

Конструкція спірального змішувального елемента Меддока складається з впускного каналу (напірний канал, позиція – 1), в який з гвинтової секції черв'яка екструдера надходить розплав полімеру. Перевагою спірального елемента Меддока є більша довжина каналів та відповідно і зазорів, через які проштовхується розплав полімеру. Напірний канал з одного боку нахилений, внаслідок поступового зменшення глибини каналу, розплав надходить до отвору

між зовнішнім діаметром змішувального елемента та внутрішнього діаметру корпусу, даний отвір називається робочим зазором змішувального елемента. Далі розплав полімеру проходячи через зазор надходить до випускного каналу (канал відведення, позиція – 2), який знаходиться після робочого зазору. Внаслідок дії надлишкового тиску розплав виходить з випускного каналу і рухається далі.

Для забезпечення ефективного диспергуючого та дистрибутивного змішування компонентів черв'яки обладнують декількома секціями змішувальних елементів, відповідно до необхідної якості змішування та реологічних властивостей розплаву полімеру. Для цього розміщують диспергуючу конструкцію змішувальних елементів (Меддока, спірального елемента Меддока та інші) та дистрибутивними конструкціями («ананасоподібна», змішувальний елемент Сакстона, Далмейджа та інші).

Конструкцію комбінованого змішувального елемента наведено на рисунку 1.13.



Рисунок 1.13 – Комбінований змішувальний елемент; спіральна бар'єрна секція, спіральний змішувальний елемент Меддока та «ананасоподібний» змішувальний елемент (Pineapple mixing section) [5]

1.7 Висновки

Проведено літературний аналіз досліджень процесу екструзії полімер каучукових сумішей, обладнання для переробки даних композицій, конструкцій змішувальних елементів та черв'яків, дослідження властивостей полімер

каучукових композицій, параметри, які впливають на процес та якість змішування екструзії полімер каучукових композицій.

При проведенні літературного огляду було визначено фізичні параметри проведення процесу змішування та диспергування: температура на вході та виході змішувального елементу, склад компонентів композиції та їх фізико-механічні властивості по відношенню кожного компоненту (адгезія компонентів, термічна та механічна деструкція компонентів тощо).

Процес змішування поліетилен–каучукових композицій відбувається в зоні гомогенізації одночерв'ячного екструдера в діапазоні температур 180 – 280 °С, швидкостей зсуву $1 - 10^4 \text{ с}^{-1}$ та супроводжується різкими змінами теплофізичних та механічних властивостей, що вимагає врахування цих змін у математичній моделі.

1.8 Мета та задачі досліджень

Метою даної роботи є встановлення закономірностей основних параметрів якості перемішування – швидкостей деформації зсуву в каналі перемішуючого елемента та вплив параметрів перемішування на проведення процесу.

Для досягнення цього необхідно сформулювати наступні задачі:

- Сформулювати фізичну модель процесу екструзії поліетилен – каучукової композиції для виробництва внутрішнього антифрикційного покриття оптоволоконних мереж зв'язку.
- Провести експериментальні дослідження визначення реологічних параметрів течії високо в'язкого розплаву поліетилен – каучукової композиції.
- Вдосконалити математичну модель процесу змішування неоднорідної системи каучуку та поліетилену;

- Вирішити математичну модель з використанням визначених реологічних параметрів перероблюваної композиції, вивести характерні залежності якості змішування поліетилен – каучукової композиції;
- Визначити визначальні параметри, що впливають на ефективність проведення процесу диспергуючого перемішування наповнювачів в полімерній композиції.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДИСПЕРГУЮЧОГО ЗМІШУВАННЯ ПРИ ЕКСТРУЗІЇ ПОЛІМЕР–КАУЧУКОВИХ СУМІШЕЙ

2.1 Обґрунтування моделі процесу екструзії полімер – каучукової композиції в змішувальному елементі

Процеси змішування та диспергування, як вже зазначалось раніше найбільше впливають на якість одержуваного розплаву слідуючи з цього і якості виробу, який буде виготовлятися з одержаних гранул. Ці процеси в загальному випадку називаються процесами гомогенізації.

Для проектування нового екструзійного обладнання та дослідження цих процесів необхідно дослідити вплив основних параметрів на процес змішування, саме тому моделювання даного процесу є важливим.

Процес диспергування та механічного перемішування неоднорідних сумішей, таких як полімери, які є неньютонівськими (псевдопластичними) рідинами, тобто їх в'язкість залежить від швидкостей зсуву та описується степеневим законом, тому за основу математичного опису даного процесу обрано математичну модель модуля гомогенізації. Дослідженню процесу гомогенізації присвячено багато теоретичних і експериментальних робіт, оскільки даний процес найбільше впливає на якість отриманого розплаву [11, с. 94].

Процес змішування неоднорідних сумішей полімерів досить складний, причому який важко описується математичними методами внаслідок багатовимірності цього процесу. Це обумовлено тим, що геометрія більшості змішувальних елементів досить складна.

Також труднощі виникають з моделюванням середовища, яке змішується внаслідок неоднорідності компонентів розплаву, які є нерозчинними один в одному. Окрім цього відомо, що при змішування рідин з різною в'язкістю фаза з меншою в'язкістю оточує (капсулює) фазу з вищою в'язкістю і вона є дисперсним

середовищем, в якому перерозподіляються та деформуються частинки більш в'язких речовин.

При змішуванні неоднорідних високов'язких сумішей, якими являються розплави полімерів основним механізмом змішування є відносний рух компонентів матеріалу в робочих органах змішувального елемента. Основними видами руху при змішуванні є молекулярна дифузія, конвекції та турбулентної дифузії.

Внаслідок високої молекулярної маси більшості полімерів молекулярна дифузія в їх розплавах повільна, тому нею в моделюванні процесу змішування можна знехтувати.

Висока в'язкість розплаву термопластів зумовлює ламінарну течію розплаву в каналах та зазорах змішувального елемента за відсутності турбулентного перенесення. Ламінарна течія розплаву називається, ще ламінарним або зсувним змішуванням.

Змішування в одночерв'ячних екструдерах відбувається в зоні гомогенізації розплаву полімеру. В даній зоні завантажений матеріал є повністю розплавленим та робимо наступні припущення, що нерозплавлені гранули полімерів в розплаві відсутні. Тому змішуються взаємно нерозчинні рідини з різними в'язкостями і визначальним критерієм оцінки якості змішування є деформація зсуву, яка виникає в розплаві при його русі і робочих елементах.

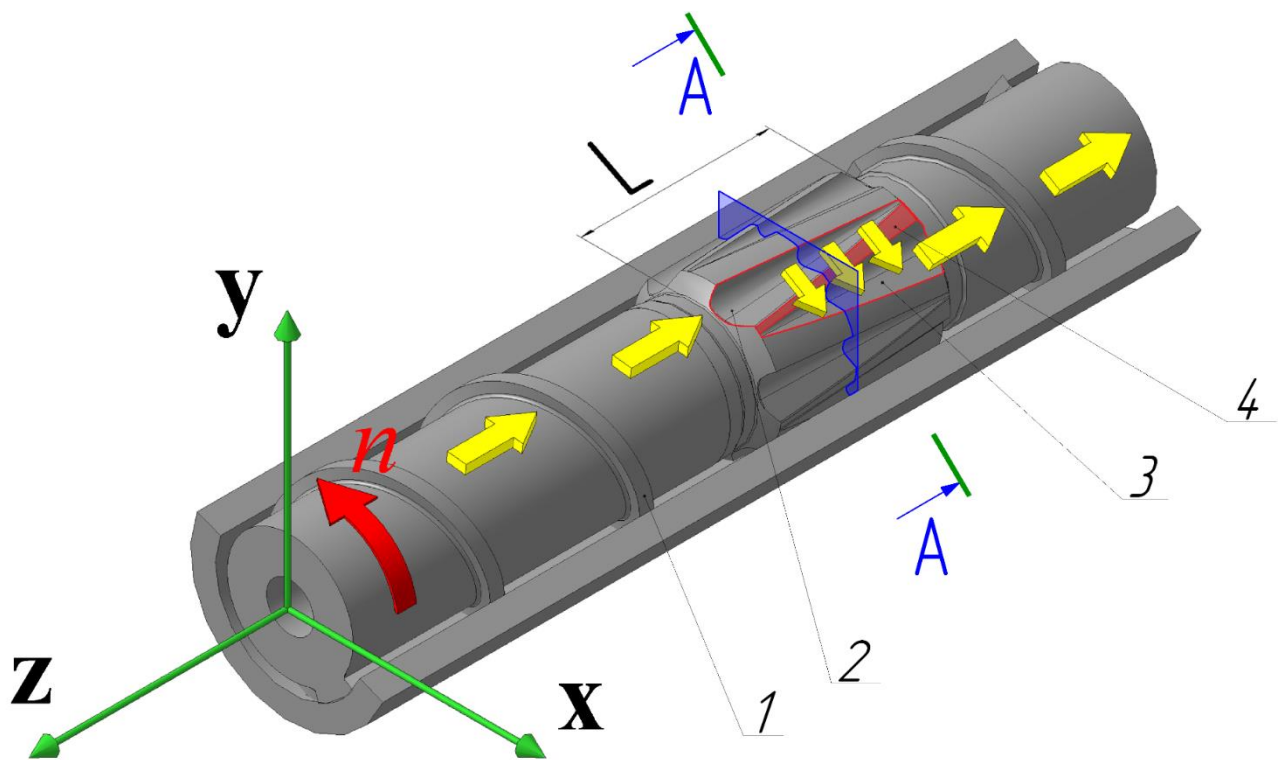
Для подальшого моделювання необхідно розглянути гідромеханічні властивості процесу змішування.

Для аналізу процесу течії розплаву в робочих каналах робочих органів екструдера перемішування та диспергування сформулюємо особливості цього процесу:

- стаціонарність процесу підготовки розплаву;
- змішування досягається фізичним переміщенням компонентів у рідині;

- ламінарний режим течії розплаву в кільцевому перетині одночерв'ячного екструдера внаслідок високої в'язкості розплаву;
- молекулярна дифузія в розплаві дуже повільна, тому її при дослідженні процесу змішування та диспергування компонентів суміші не враховують;
- неоднорідне швидкісне поле в каналах та зазорах змішувального елементу створює неоднорідні швидкості деформації і дисипативні тепловиділення;
- низька теплопровідність полімеру призводить до реологічної неоднорідності (різної в'язкості розплаву в об'ємі полімеру);
- неоднорідність розплаву полімеру також обумовлена внаслідок різної в'язкості компонентів, що перемішуються;
- розміри частинок компонентів, що перемішуються різні;
- конструктивні особливості робочих каналів черв'яка та змішувального елемента, які передбачають, що деякі геометричні розміри є визначальними, а саме величина деяких розмірів є набагато меншою за величину інших (глибина каналу нарізки черв'яка, зазор між рухомими та нерухомими циліндрами, тощо) та втрати матеріалу через їх є нехтовно малими по відношенню з робочими геометричними розмірами;
- середовище є однорідним та суцільним, в ньому відсутні порожнини;
- використовуючи припущення, що при зміні систем координат обертових елементів конструкції (обертовий черв'як та нерухомий циліндр і обертовий циліндр та нерухомий черв'як) отримані значення будуть еквівалентні.

Процес ламінарного змішування розплаву композиції полімеру в змішувальному елементі одночерв'ячного екструдера пояснюється за принциповій схемі, яку наведено на рисунку 2.1.



1 – гвинтова нарізка; 2 – впускний канал; 3 – випускний канал; 4 – робочий зазор; L – довжина змішувального елемента

Рисунок 2.1 – Схема процесу ламінарного змішування в змішувальному елементі

При обертанні черв'яка утворюється градієнт тиску, який створює ламінарну течію розплаву полімеру вздовж каналу одночерв'ячного екструдера.

Після проходження гвинтової лінії черв'яка розплав потрапляє до впускного каналу змішувального елемента. Оскільки розплав є гетерофазним, тобто складається з двох або більше нерозчинних один в одному компонентів один з яких є дисперсним середовищем, в якому знаходяться агломерати диспергованої фази, то моделювання середовища є ускладняється. Тому для спрощення моделі приймаємо наступне, агломерати каучуку мають форму сфери з початковим діаметром d_0 . Причому розмір частинок включень дисперсної фази набагато більше за розмір частинок дисперсного середовища, тому модельоване середовище має вигляд однорідної рідини, яка є дисперсним середовищем в якій

довільним способом знаходяться агломерати каучуку та наповнювачів, які є диспергуючою фазою.

Після виходу розплаву з гвинтової лінії утворений градієнт тиску по осі z проштовхує розплав в впускний канал змішувального елементу. Згідно припущень та особливостей наведених вище розплав потрапляє тільки в впускний канал змішувального елементу. Внаслідок того, що конструкція впускного каналу відкрита для входу розплаву та закрита з виходу, розплав заповнить його повністю. Після того, як заповнений розплавом впускний канал та використовуючи припущення, що середовище є однорідним і суцільним, розплав витісниться з впускного каналу змішувального елементу під дією градієнту тиску в поперечному напрямі. Витіснений об'єм розплаву, який рухається в бік виходу з впускного каналу наступає на рухомий нахилений виступ, який рухається назустріч потоку розплаву зі швидкістю обертання черв'яка. При зменшенні глибини впускного каналу радіальна складова профілю швидкостей зсуву зростає та створюються інтенсивні деформації зсуву, внаслідок чого агломерати почнуть руйнуватися та подрібнюватися. Саме цей процес є визначальним при змішуванні даних композицій та визначає якість перемішування.

Профіль швидкостей в зазорі, буде відмінним від початкового профілю в впускному каналі. Згідно принципу роботи та уявлень про даний процес зазор між корпусом та нахиленим виступом є робочим зазором змішувального елементу.

Інтенсифікація профілю швидкостей зсуву в робочому зазорі призводить до збільшення напружень, які виникають в розплаві. Окрім перерозподілу компонентів суміші полімеру необхідно одночасно подрібнити (розтерти) їх. Даний процес називається диспергуючим змішуванням. Слід також зазначити, що чим складніше профіль швидкостей в робочих каналах та зазорах змішувального елементу тим вищою буде якість змішування.

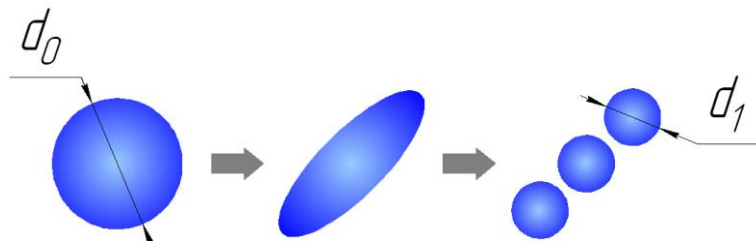
При процесі диспергуючого змішування необхідною умовою подрібнення агломератів наповнювачів є більша величина напружень зсуву в розплаві від певного значення величини руйнування агломератів, яка є різною для кожної речовини. Якщо напруження зсуву будуть менші від значення величини руйнування агломератів то розділення та подрібнення агломератів не відбудеться.

В процесі диспергуючого змішування відбувається збільшення поверхні поділу фаз компонентів. Якість ламінарного змішування визначається деяким значенням накопиченої сумарної деформації зсуву в суміші, після досягнення якого подальше змішування стає недоцільним [11, с. 120].

Наразі в літературі наведено декілька теорій даного процесу, але чіткого їх об'єднання з практикою на даний момент не є повним, тому удосконалення методики розрахунку та моделювання процесу диспергуючого змішування з застосуванням комп'ютерної техніки є актуальним. При моделюванні процесу змішування в одночерв'ячному екструдері зі змішувальним елементом важливим є створення моделі, яка врахує неньютонівську поведінку течії розплаву полімеру.

Згідно раніше наведених припущень включення диспергованої фази для спрощення розрахунків приймаємо в сферичному вигляді, та як було сказано раніше розмір частинок дисперсного середовища набагато менший за розмір частинок диспергованої фази, тому середовище розплаву полімеру є рідиною. Як відомо більшість полімерів є неньютонівськими рідинами, тому напруження, що виникають в них залежать від швидкостей за степеневим законом.

На рисунку 2.2, 2.3 наведено принципову схему диспергування агломератів в каналі екструдера в зоні гомогенізації.

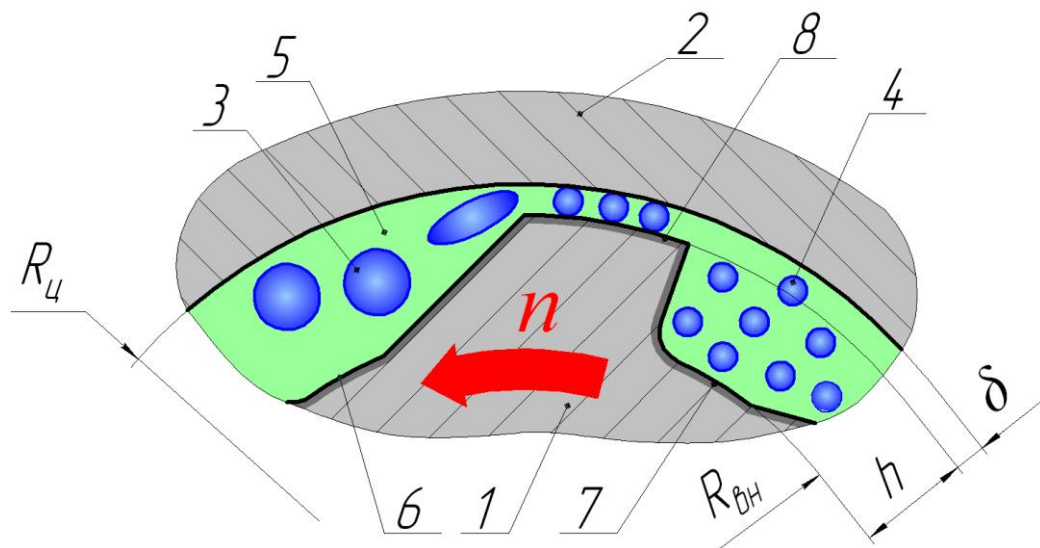


d_0 – середній початковий діаметр агломерату диспергованої фази, м;

d_1 – середній кінцевий діаметр агломерату диспергованої фази, м

Рисунок 2.2 – Схема диспергування агломератів в змішувальному елементі

В впускному каналі та перед робочим зазором розплав дисперсного середовища, в якому містяться включення диспергованого середовища з середнім початковим діаметром d_0 . під дією надлишкового тиску, який створюється в гвинтовому каналі екструдера та утворюється радіальна складова профілю швидкостей зсуву.



1 – ротор; 2 – корпус; 3 – диспергуюча фаза; 4 – диспергована фаза;

5 – дисперсне середовище; 6 – впускний канал; 7 – випускний канал;

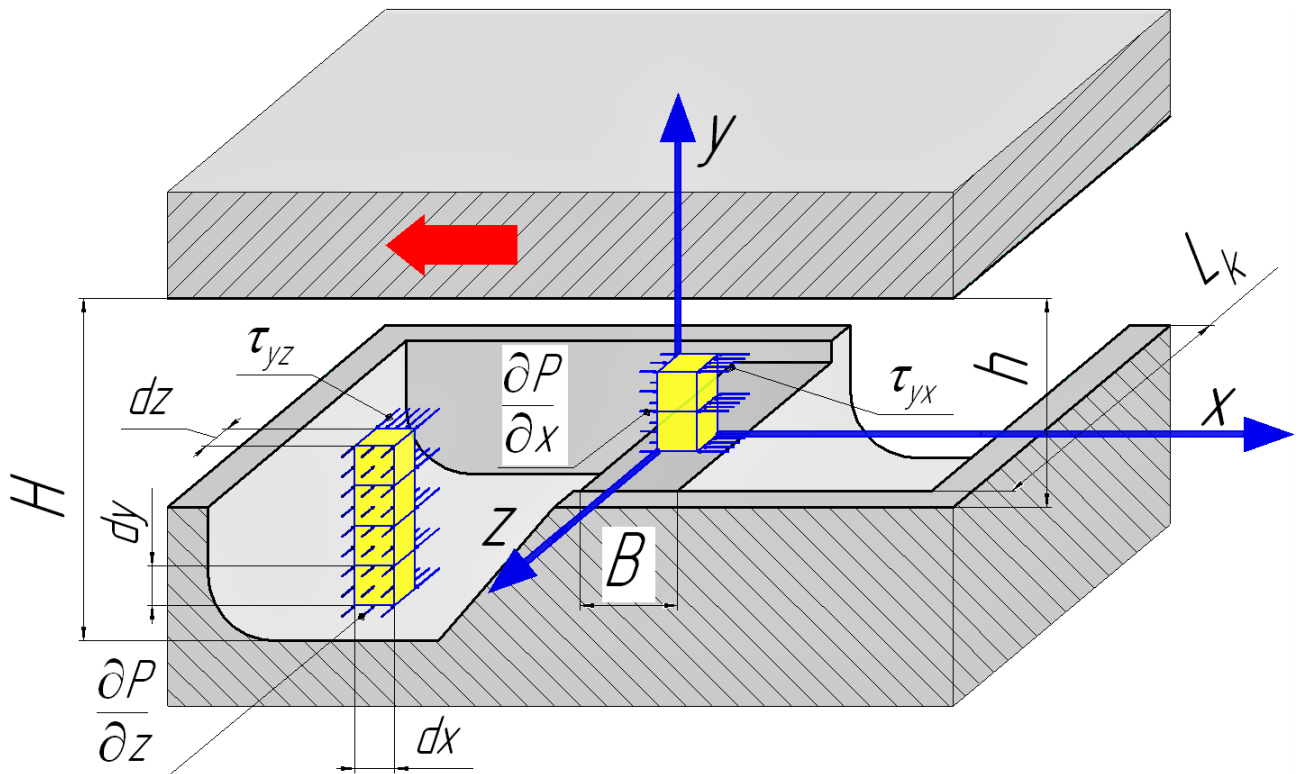
8 – робочий зазор; n – швидкість обертання черв'яка; $R_{вн}$ – внутрішній радіус змішувального елементу; $R_{ц}$ – внутрішній радіус корпусу; h – глибина робочого виступу; δ – робочий зазор

Рисунок 2.3 – Процес диспергування агломератів в змішувальному елементі

При течії розплаву у робочому зазорі змішувального елементу створюється складний профіль швидкостей потоку, внаслідок чого агломерати руйнуються під дією швидкостей деформації. Чим інтенсивніші та складніший профіль швидкості по висоті зазору тим процес змішування є ефективнішим.

2.2 Фізична модель процесу диспергуючого змішування полімер – каучукових композицій

Фізична модель процесу описує процес змішування неоднорідної суміші поліетилену та каучуку.



H – глибина каналу; h – глибина зазору між корпусом та змішувальною секцією;
 B – ширина робочого зазору; L – довжина каналу; dx , dy , dz – розміри елементарного об'єму; $\partial P/\partial x$ – градієнт тиску в поперечному напрямі;
 $\partial P/\partial z$ – градієнт тиску в повздовжньому напрямі

Рисунок 2.4 – Геометричні умови та сили, що діють на розплав полімеру

Виділяємо елементарний об'єм рідини в впускному каналі та змішувальному елементі ∂x , ∂y , ∂z та проектуємо всі сили, що діють на елементарний об'єм у відповідних осях координат.

На елементарний об'єм діють градієнти тиску $\partial P/\partial z$, $\partial P/\partial x$ по осі z та x . Внаслідок дії градієнтів тиску на елементарний об'єм виникають відповідні сили опору, які в даній схемі виражені через напруження зсуву в матеріалі τ_{yx} , τ_{yz} .

Відповідно до фізичної моделі формулюємо математичну модель процесу.

Для вирішення математичної моделі процесу течії розплаву в робочих елементах необхідно визначити граничні умови. Для цього необхідно розглянути гідромеханічні параметри ламінарної течії розплаву в робочих органах змішувального елемента та сформулювати відповідні припущення.

Принципову схему гідромеханічних параметрів процесу ламінарної течії в каналі та робочому зазорі зображено на рисунках 2.5, 2.6.

Сформулюємо наступні особливості та спрощення щодо моделювання течії розплаву в робочих органах змішувального елемента:

- середовище є суцільним в ньому відсутні тверді включення та порожнини, оскільки всі гранули полімеру і наповнювачів знаходяться в розплавленому стані;
- процес відбувається за сталої температури, тобто є ізотермічним $T = const.$;
- розплав полімеру піддається степеневому закону Освальда – де Валя;
- циліндричну систему координат спрощуємо до плоско паралельної моделі;
- розмір (середній діаметр) включень диспергованої фази на порядок більший за розмір частинок дисперсного середовища тому середовище представляє собою рідину, в якій містяться включення наповнювачів;
- проковзування розплаву на стінках рухомих та нерухомих елементах відсутнє;
- швидкість розплаву на нерухомих стінках дорівнює нулю;
- швидкість розплаву на рухомих стінках дорівнює швидкості стінки;
- гравітацією та прискоренням розплаву в робочих елементах не враховуємо

для спрощення розрахунків.

Розглянемо профіль швидкості в впускному каналі глибиною H згідно з зазначеними припущеннями. Принципову епюру профілю швидкостей в впускному каналі зображено на рисунку 2.5.

Впускний канал змішувального елементу являє собою повздовжній глухий паз, виконаний на корпусі черв'яка, який і є змішувальним елементом.

Згідно вищенаведених спрощень будуємо принципову схему епюру профілю швидкостей в впускному та випускному каналах змішувального елементу та формулюємо граничні умови швидкості потоку.

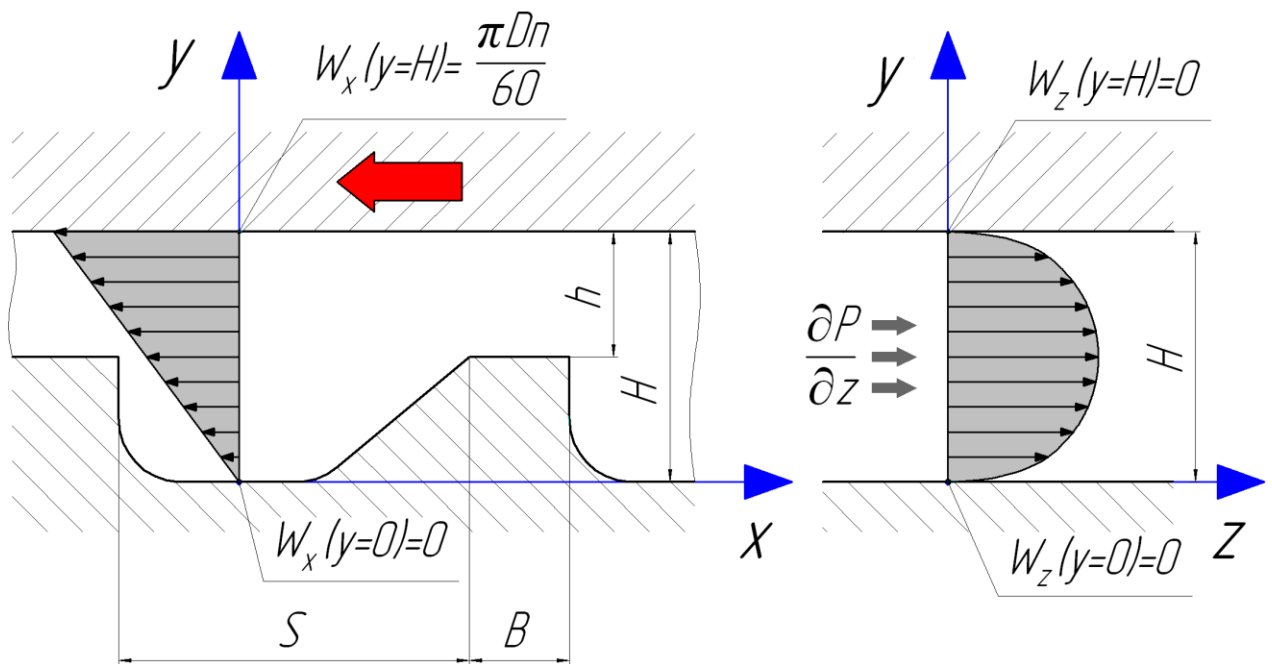
Розплав полімеру рухається в впускному та випускному каналі внаслідок дії градієнту тиску $\partial P / \partial z$, який насамперед залежить від масової продуктивності розплаву, реологічних параметрів розплаву та геометрії каналу.

По площині xu : на розплав не діє градієнт тиску, рух розплаву відбувається тільки за допомогою рухомої стінки циліндру корпуса.

По площині uz : розплав рухається ламінарною течією в каналі змішувального елементу внаслідок дії надлишкового тиску, який виникає в каналі гвинтової зони екструдера.

Згідно особливостей проведення процесу рух розплаву по глибині зазорів т каналів відсутній, тому проекція швидкості потоку в вертикальному напрямі рівна нулю $W_y = 0$.

Відповідно до схеми наведемо граничні умови швидкості потоку, які будуть використані для розв'язання рівняння збереження кількості руху математичної моделі процесу гомогенізації розплаву полімер–каучукових композицій.



S – ширина каналу, м; B – ширина робочого зазору, м; h – глибина робочого зазору, м; H – глибина каналу, м; W_x , W_y , W_z – проекції швидкостей руху розплаву композиції у каналі змішувальної секції

Рисунок 2.5 – Схема епюри профілю швидкостей розплаву в впускному каналі змішувального елементу

Граничні умови швидкості потоку розплаву в впускному та випускному каналі змішувального елементу:

- поперечна складова швидкості потоку на нерухомій:

$$W_x(y=0)=0;$$

- поперечна складова швидкості потоку на рухомій стінці:

$$W_x(y=H)=\frac{\pi \cdot D \cdot n}{60};$$

- повздовжня складова швидкості потоку на нерухомій стінці:

$$W_z(y=0)=0;$$

- повздовжня складова швидкості потоку рухомій стінці:

$$W_z(y=H)=0.$$

Розплав полімеру рухається внаслідок дії градієнтів тиску, що виникає при обертанні гвинтової нарізки черв'яка по осі z : $\partial P / \partial z$. Після того, як розплав полімеру повністю заповнює впускний канал, розплав починає рухатися в єдиному можливому напрямі – через робочий зазор змішувального елементу. Внаслідок цього виникає градієнт тиску по осі x : $\partial P / \partial x$, який намагається протиснути розплав через робочий зазор глибиною h .

Розглянемо профіль швидкості у робочому зазорі змішувального елементу глибиною h . Принципову епюру профілю швидкостей в робочому зазорі зображено на рисунку 2.6.

Розплав полімеру який рухається з впускного каналу внаслідок дії надлишкового тиску, який створюється в каналі екструдера, прямує до випускного каналу. Внаслідок зменшення глибини у зазорі створюється складний профіль швидкостей та відповідно інтенсифікація процесу змішування та диспергування компонентів суміші.

Відповідно до наведених припущень та спрощень формулюємо граничні умови швидкості потоку в робочому зазорі змішувального елементу, які будуть застосовуватися для розв'язку математичної моделі процесу:

- поперечна складова швидкості потоку на нерухомій стінці:

$$W_x(y=0)=0;$$

- поперечна складова швидкості потоку на рухомій стінці:

$$W_x(y=h)=\frac{\pi \cdot D \cdot n}{60};$$

- повздовжня складова швидкості потоку на нерухомій стінці:

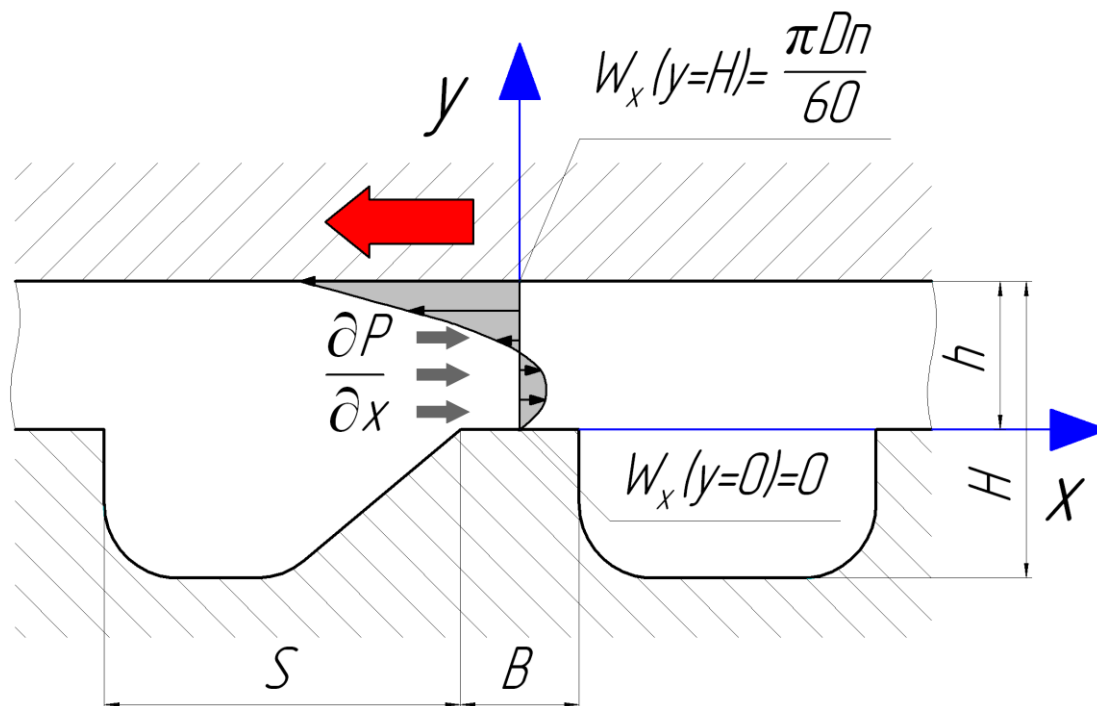
$$W_z(y=0)=0;$$

- повздовжня складова швидкості потоку на рухомій стінці:

$$W_z(y=h)=0.$$

Сформульовано фізичну модель процесу течії розплаву полімеру в робочих органах змішувального елементу, визначено особливості процесу та

наведено граничні умови.



S – ширина каналу, м; B – ширина робочого зазору, м; h – глибина робочого зазору, м; H – глибина каналу, м; W_x, W_y, W_z – проекції швидкостей руху розплаву композиції у каналі змішувальної секції в координатних осях x, y, z за граничних умов

Рисунок 2.6 – Граничні та початкові умови швидкості потоку розплаву в робочому зазорі змішувального елементу

Сформульовано граничні умови швидкості. Отримані граничні умови дозволяють розв’язати систему рівнянь збереження кількості руху математичної моделі процесу гомогенізації розплаву полімер–каучукових композицій.

2.3 Математична модель процесу течії розплаву в каналах і зазорах змішувального елементу

Для опису математичної моделі процесу течії розплаву обираємо плоскопаралельну модель, внаслідок того, що геометричні розміри робочих

зазорів та каналів змішувального елементу на порядок менші за діаметр черв'яка.

Виділяємо елементарний об'єм в каналі та робочому зазорі змішувального елементу та проектуємо всі сили, що діють на нього по осях.

Зробивши відповідні припущення, щодо плоско паралельної моделі та визначальних геометричних розмірів та величин отримаємо рівняння рівноваги сил, що діють на розплав у робочих зазорах і каналах змішувального елементу, яке являє собою спрощене рівняння збереження кількості руху по координатних осях:

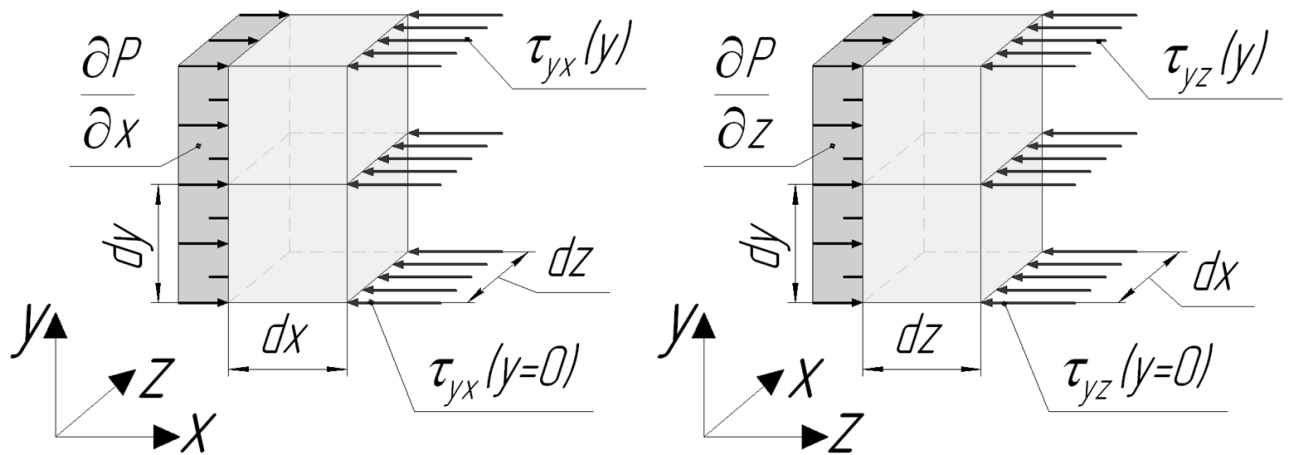


Рисунок 2.7 – Сили, що діють на елементарний об'єм рідини

На елементарний об'єм рідини діє градієнт тиску, який згідно третього закону Ньютона урівноважується силами внутрішнього тертя. Тоді спрощене рівняння збереження кількості руху без врахування сил гравітації та інерції по координатних осях має вигляд:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = 0 \quad (2.2)$$

Згідно рівнянь (2.1), (2.2) сили тиску в потоці полімеру урівноважуються силами в'язкості, компоненти тензора напружень дорівнюють:

$$\tau_{yx} = \mu_{ef} \cdot \frac{\partial W_x}{\partial y}; \quad (2.3)$$

$$\tau_{yz} = \mu_{ef} \cdot \frac{\partial W_z}{\partial y} \quad (2.4)$$

де μ_{ef} – в'язкість ньютонівської рідини, Па·с; W_x , W_z – швидкості потоку вздовж осей x та z , м/с; τ_{yx} , τ_{yz} – напруження зсуву, Па.

Підставляючи вирази (2.5) та (2.6) до рівняння (2.3) і (2.4) отримуємо наступні вирази:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_{ef} \cdot \frac{\partial W_x}{\partial y} \right] = 0 \quad (2.5)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_{ef} \cdot \frac{\partial W_z}{\partial y} \right] = 0 \quad (2.6)$$

Рух розплаву полімеру в каналі насадки шнека є складним, тому для визначення ефективної в'язкості μ_{ef} використовується другий інваріант швидкості зсуву:

$$\mu_{ef} = \mu_0 \left(\frac{I_{II}}{2} \right)^{\frac{n-1}{2}}, \quad (2.7)$$

де μ_0 – в'язкість при нульовому зсуву, Па·с;

n – реологічна константа:

Другий варіант тензора швидкостей деформації:

$$0,5 \cdot I_{II} = \left[\left(\frac{\partial W_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial y} \right)^2 \right]. \quad (2.8)$$

В'язкість розплаву експериментально можна визначити за степеневим законом Освальда – де Віля [10, с. 179]:

$$\mu_{ef} = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}, \quad (2.9)$$

де n – показник степені (індекс значення);

$\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с⁻¹;

K – коефіцієнт консистентності, $\text{Па} \cdot \text{с}^n$.

Наявність в розплаві рідких включень наповнювачів, неоднорідність їх розподілення в об'ємі полімеру а також можливість однаковим порядком величин розмірів частинок з глибиною каналу досить сильно ускладнює розрахунок гідродинаміки, внаслідок складності підбору реологічних параметрів, які задовільно опишуть параметри процесу або їх опис є досить складним.

Для цього використаємо модель ньютонівської моделі рідини з внесеними уточненнями, використання даного спрощення дає задовільну для інженерних розрахунків точність.

У наближенні методу ступеневої апроксимації в межах елемента в'язкість будемо вважати постійною і визначати її з середніх значень швидкостей зсуву.

Тоді рівняння (2.7) та (2.8) набувають вигляду:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_{ef} \cdot \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} = 0 \quad (2.10)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \mu_{ef} \cdot \frac{\partial^2 W_z}{\partial y^2} = 0 \quad (2.11)$$

Рівняння (2.10) та (2.11) є рівняння збереження кількості руху в робочих каналах та зазорах змішувального елемента та являють собою рівняння рівноваги сил, що діють в розплаві при його проходженні в робочих каналах та зазорах змішувального елемента.

Рівняння (2.10) та (2.11) можна переписати в такому вигляді:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu_{ef} \cdot \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \mu_{ef} \cdot \frac{\partial^2 W_z}{\partial y^2} \quad (2.13)$$

Напруження зсуву в матеріалі для неньютонівських (псевдопластичних) рідин досить точно описується степеневим законом Освальда – де Віля, Па:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (2.14)$$

де n – показник степені (індекс течії розплаву);

$\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с^{-1} ;

K – коефіцієнт консистентності, $\text{Па} \cdot \text{с}^n$.

Рівняння (2.14) можна використовувати тільки для додатних значень величин швидкостей зсуву, для від'ємних швидкостей зсуву необхідно застосовувати більш загальну формулу даного закону:

$$\tau = K \cdot |\dot{\gamma}|^{n-1} \cdot \dot{\gamma}, \quad (2.15)$$

Градiєнти тиску визначаємо з рівняння нерозривності в диференціальній формі:

$$\frac{\partial W_x}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial y} = 0, \quad (2.16)$$

Або в інтегральній формі

$$Q = l \cdot \int_0^y W_x(y) dy. \quad (2.17)$$

де l – довжина робочого елемента, м.

Компоненти швидкості зсуву, с^{-1} :

$$\dot{\gamma}_x = \frac{\partial W_x}{\partial y}; \quad \dot{\gamma}_z = \frac{\partial W_z}{\partial y} \quad (2.18)$$

Критерієм якості змішування є величина накопиченої деформації зсуву:

$$\gamma = \int \dot{\gamma} dt = \dot{\gamma} \cdot t. \quad (2.19)$$

Середній час перебування частинок розплаву, с:

$$t = \frac{V}{Q}, \quad (2.20)$$

де V – об'єм апарату, м^3 ;

Q – об'ємні витрати, $\text{м}^3/\text{с}$.

Рівняння збереження енергії:

$$\rho C \left(W_x \frac{\partial T}{\partial x} + W_y \frac{\partial T}{\partial y} + W_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = q_d \quad (2.21)$$

Потужність дисипації, Вт:

$$q_d = \tau_{yx} \frac{\partial W_x}{\partial y} + \tau_{yz} \frac{\partial W_z}{\partial y} \quad (2.22)$$

Нехтуючи конвективним перенесенням енергії вздовж осі y і вважаючи, що температура вздовж осі x не змінюється, спростивши рівняння (2.22), визначаємо потужність дисипації у змішувальному елементі, Вт:

$$\Delta N_d = B \cdot L \cdot \int_0^h \mu_{ef} \cdot \left[\left(\frac{\partial W_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial y} \right)^2 \right] dy. \quad (2.23)$$

Перегрів розплаву $^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta T = \frac{\Delta N_d}{G \cdot C_p}, \quad (2.24)$$

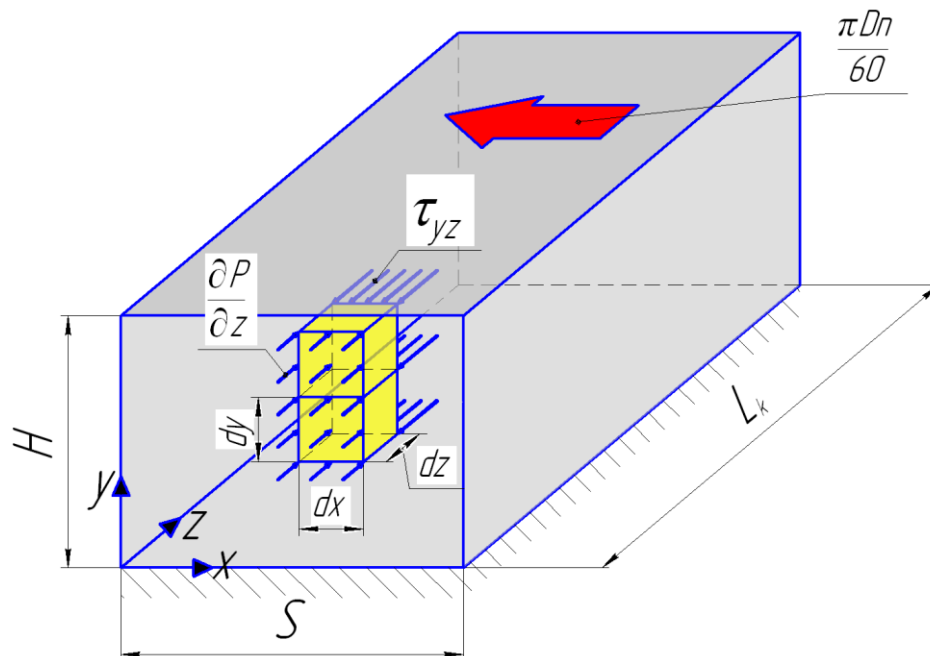
де G – масова продуктивність, кг/с; C_p – питома теплоємність розплаву полімеру, Дж/(кг $\cdot^{\circ}\text{C}$).

Критерієм якості змішування та диспергування є величина накопиченої деформації зсуву. Для отримання якісної структури матеріалу необхідно подрібнити розміри включень дисперсної фази і рівномірно розподілити в об'ємі дисперсного середовища. При ламінарному змішуванні це досягається шляхом зсуву шарів розплаву відносно одного та розриву течії розплаву (накопиченою деформацією зсуву). Цього можна досягти завдяки проходженні розплаву через зазор змішувального елемента, внаслідок чого швидкості зсуву збільшуються та відбувається процес диспергування агломератів диспергованої фази в дисперсному середовищі.

Для повного опису процесу течії розплаву через робочі елементи змішувальної секції необхідно сформулювати фізичну та математичну моделі в каналах та зазорах змішувального елемента.

Рух розплаву в каналах змішувального елемента можна представити, як рух розплаву в каналі з висотою H , шириною S та довжиною L . Причому канал є

нерухомим, верхня стінка рухається з лінійною швидкістю. Схему процесу течії розплаву в каналі змішувального елемента наведено на рисунку 2.8.



S – ширина каналу, м; B – ширина робочого зазору, м; H – глибина каналу, м;
 L_k – довжина каналу, м; dx , dy , dz – розміри елементарного об'єму

Рисунок 2.8 – Схема течії розплаву в каналі

Рівняння збереження кількості руху вздовж каналу змішувального елемента має вигляд:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \mu_{ef} \cdot \frac{\partial^2 W_z}{\partial y^2} \quad (2.25)$$

Розглянемо рух полімеру вздовж каналу (вісь yz). Для розв'язання рівняння (2.10) виразимо складову W_z , для цього двічі проінтегруємо рівняння, отримуємо:

$$W_z = \frac{1}{\mu_{ef}} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \cdot \frac{y^2}{2} + C_1 \cdot y + C_2 \quad (2.26)$$

Граничні умови для визначення сталих інтегрування C_1 та C_2 :

$$\begin{cases} W_z(y=0) = 0; \\ W_z(y=H) = 0; \end{cases} \quad (2.27)$$

З використанням даних граничних умов знаходимо сталі інтегрування:

$$\begin{cases} C_2 = 0; \\ C_1 = -\frac{1}{2 \cdot \mu_{ef}} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \cdot H; \end{cases} \quad (2.28)$$

Підставляємо отримані значення сталих інтегрування та зробивши відповідні спрощення отримуємо наступне, м/с:

$$W_z = \frac{1}{2\mu_{ef}} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \cdot (Hy - y^2) \quad (2.29)$$

де H – глибина каналу змішувального елементу, м;

$\partial P / \partial z$ – градієнт тиску, Н/м³.

Швидкість зсуву у каналі змішувального елементу, с⁻¹:

$$\dot{\gamma}_z = \frac{\partial W_z}{\partial y} = \frac{1}{2\mu_{ef}} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \cdot (H - 2y) \quad (2.30)$$

Градієнт тиску знаходимо з рівняння нерозривності. Складова швидкості W_z визначає масову витрату вздовж координати z , тобто кількість розплаву, що надходить з гвинтової нарізки екструдера до впускного каналу змішувального елементу, кг/с:

$$G = \rho \cdot H \cdot S \frac{1}{H} \int_0^H W_z dy, \quad (2.31)$$

де H – глибина каналу, м;

S – ширина каналу, м;

ρ – густина розплаву, кг/м³;

G – масова продуктивність, кг/с.

Після підстановки до виразу (2.31) значення швидкості W_z , інтегрування та виразивши значення градієнту тиску отримуємо, Н/м³:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{12 \cdot \mu_{ef} \cdot G}{\rho \cdot S \cdot H^3}. \quad (2.32)$$

Розглянемо рух полімеру впоперек каналу (вісь x). В даному випадку течія розплаву полімеру в каналі відбувається між нерухомою стінкою і рухомою

площиною, яка рухається під дією сили зі швидкістю W_x .

Рухомо стінка створює рух полімеру без дії градієнту тиску, звідси рівняння збереження кількості руху по осі x :

$$\mu_{ef} \cdot \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} = 0 \quad (2.33)$$

Виразимо з рівняння складову швидкості W_x та двічі проінтегруємо рівняння, отримуємо, м/с:

$$W_x = \frac{1}{\mu_{ef}} \cdot (C_1 \cdot y + C_2) \quad (2.34)$$

Граничні умови для визначення сталих інтегрування C_1 та C_2 :

$$\begin{cases} W_x(y=0) = 0; \\ W_x(y=H) = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}; \end{cases} \quad (2.35)$$

З використанням даних граничних умов знаходимо сталі інтегрування:

$$\begin{cases} C_2 = 0; \\ C_1 = \mu_{ef} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \cdot \frac{1}{H}; \end{cases} \quad (2.36)$$

Підставляємо отримані значення сталих інтегрування та зробивши відповідні спрощення отримуємо наступне, м/с:

$$W_x = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \cdot \frac{y}{H} \quad (2.37)$$

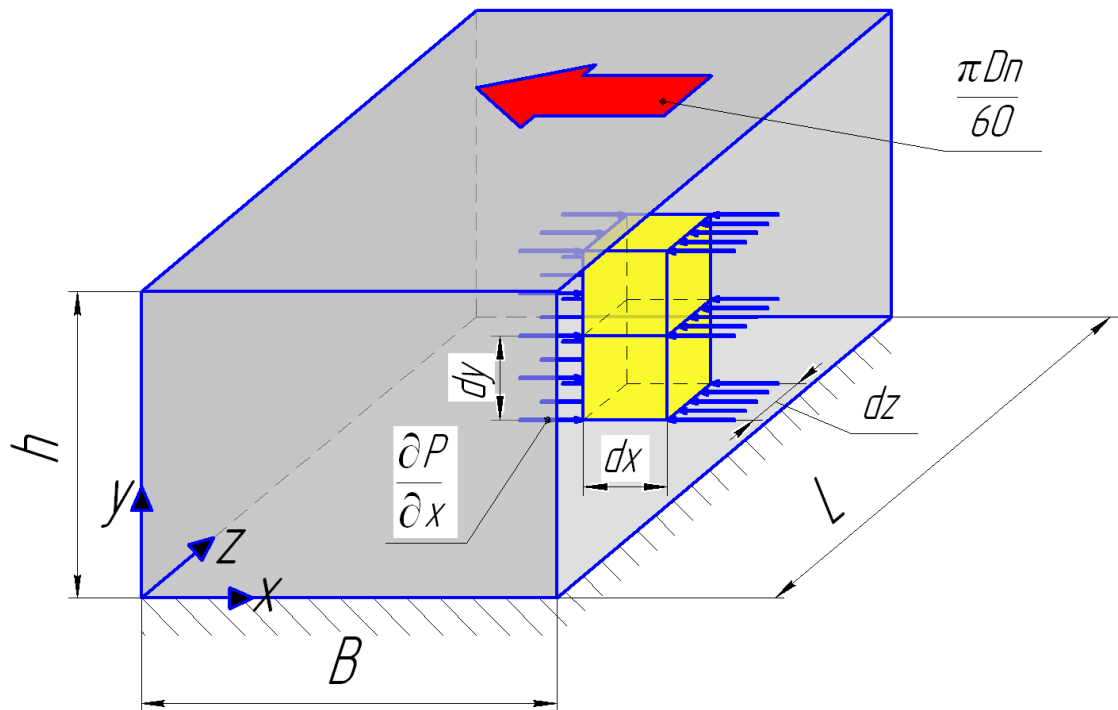
Швидкість зсуву у каналі змішувального елемента, s^{-1} :

$$\dot{\gamma}_x = \frac{\partial W_x}{\partial y} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot H} \quad (2.38)$$

Далі визначаються за залежностями наведеними в минулому розділі, величини накопиченої деформації зсуву, напружень в матеріалі, часу перебування розплаву в каналі, енергії дисипації та зміну температури в розплаві. Профіль швидкості вздовж каналу описується квадратичною залежністю. Рух розплаву впоперек каналу піддається лінійному закону, внаслідок того, що рух

відбувається градієнт тиску рівний нулю, даний вид руху називається простим зсувом.

В каналах змішувального елементу відбувається ламінарна течія розплаву та її стискання та ущільнення розплаву в закритому каналі. Конструкція змішувального елементу передбачає єдиний напрям руху розплаву з каналу через робочий зазор, який являє собою прямокутний отвір шириною B висотою h та довжиною l .



S – ширина каналу, м; B – ширина робочого зазору, м; H – глибина каналу, м;
 L – довжина зазору, м; dx , dy , dz – розміри елементарного об'єму

Рисунок 2.9 – Схема течії розплаву в зазорі

Рух розплаву в повздовжньому напрямі (по осі z) та по висоті каналу (по осі y) через незначний вплив можна знехтувати, тому рівняння збереження кількості руху в робочих зазорах змішувального елементу має вигляд:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu_{\text{ef}} \cdot \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} ; \quad (2.39)$$

Для розв'язання рівняння (2.39) виразимо складову W_x , для цього двічі

проінтегруємо рівняння, отримуємо:

$$W_x = \frac{1}{\mu_{ef}} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{y^2}{2} + C_1 \cdot y + C_2 \quad (2.40)$$

Граничні умови для визначення сталих інтегрування C_1 та C_2 :

$$\begin{cases} W_x(y=0) = 0; \\ W_x(y=h) = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}; \end{cases} \quad (2.41)$$

З використанням даних граничних умов знаходимо сталі інтегрування:

$$\begin{cases} C_2 = 0; \\ C_1 = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \cdot \frac{1}{h} - \frac{1}{2 \cdot \mu_{ef}} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \cdot h; \end{cases} \quad (2.42)$$

Підставляємо отримані значення сталих інтегрування та зробивши відповідні спрощення отримуємо вираз для знаходження швидкості:

$$W_x = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \cdot \frac{y}{h} - \frac{1}{2 \cdot \mu_{ef}} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \cdot (hy - y^2) \quad (2.43)$$

де h – глибина зазору між корпусом та змішувальною секцією, м;

D – внутрішній діаметр корпусу, м;

n – швидкість обертання рухомого циліндру, об/хв;

$\partial P / \partial x$ – градієнт тиску, Н/м³.

Швидкість зсуву в робочому зазорі змішувального елемента, с⁻¹:

$$\dot{\gamma}_x = \frac{\partial W_x}{\partial y} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot h} - \frac{1}{2 \cdot \mu_{ef}} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \cdot (h - 2y) \quad (2.44)$$

Внаслідок того, що середовище є суцільним та нерозривним, то кількість розплаву полімеру, який надійшла в канал рівна кількості розплаву, що проходить через зазор. Градієнт тиску знаходимо з рівняння нерозривності:

$$G = \rho \cdot h \cdot l \cdot \frac{1}{h} \int_0^h W_x dy, \quad (2.45)$$

де ρ – густина розплаву, кг/м³;

l – довжина зазору, м;

G – масова продуктивність екструдера, кг/с.

Після підстановки до виразу (2.45) значення швидкості W_x , інтегрування та вираження значення градієнту тиску отримуємо, Н/м³:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = 12 \cdot \mu_{ef} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot h^2} - \frac{G}{\rho \cdot l \cdot h^3} \right). \quad (2.46)$$

Напруження, що виникають в розплаві, Па:

$$\tau = K \cdot |\dot{\gamma}_x|^{n-1} \cdot \dot{\gamma}_x, \quad (2.47)$$

Потужність дисипації в об'ємі елементу Вт:

$$\Delta N_d = B \cdot l \cdot \int_0^h \mu_{ef} \left(\frac{\partial W_x}{\partial y} \right)^2 dy, \quad (2.48)$$

де B – ширина зазору, м.

Перегрів розплаву, °С:

$$\Delta T = \frac{\Delta N_d}{G \cdot C_p} \quad (2.49)$$

де C_p – питома теплоємність розплаву, Дж/(кг·с);

G – масова продуктивність, кг/с.

Профіль швидкостей по висоті зазору відповідає квадратичній залежності, швидкості зсуву описуються лінійною залежністю по висоті зазору, накопичену деформацію зсуву та напруження, які виникають в розплаві. Окрім цього важливим також є знаходження величини потужності дисипації, та температури розплаву внаслідок течії в робочих зазорах для попередження можливості термічної деструкції.

2.4 Методика розв'язання математичної моделі процесу течії розплаву в робочих зазорах змішувального елементу

Розв'язок даної математичної моделі здійснюється за допомогою програмного середовища Mathcad з використання методу кінцевих різниць ступеневої апроксимації, програма розрахунку, якого наведена в додатку Д.

Розв'язок даної моделі проводиться за даною методикою:

1. Аналіз функціональної залежності, за якою відбувається процес та її опис диференціальним рівнянням.
2. Визначення технологічних параметрів процесу.
3. Визначення реологічних та теплофізичних параметрів речовини, що переробляється та їх функціональних залежностей.
4. У область розв'язування рівняння, яке розглядається, введення рівномірної сітки N, M вузлових точок відповідно до характеру задачі і граничних умов. Внаслідок того, що при розв'язанні математичної моделі течії розплаву в робочих зазорах змішувального елемента необхідно дослідити зміни гідродинамічних параметрів по висоті каналу.
5. Чисельне розв'язання диференціального рівняння, у нерушійній системі координат, замінюючи похідні кінцевими різницями, приведене до вигляду різницевого рівняння. Отримане різницеве рівняння використовують далі для описування функціонального зв'язку між сусідніми вузлами сітки. Тобто різницеве рівняння записують для усіх вузлів сітки і отримують внаслідок цього систему $(N - 1) \cdot (M - 1)$ рівнянь з $(N - 1) \cdot (M - 1)$ невідомими.
6. Систему $(N - 1) \cdot (M - 1)$ рівнянь з $(N - 1) \cdot (M - 1)$ невідомими розв'язують одним із відомих швидких і ефективних чисельних методів, вибір яких визначається деякими властивостями системи рівнянь. Для розрахунку даної математичної моделі використовуємо методи ступеневої апроксимації та вбудовані чисельні методи в програмному середовищі Mathcad. Згідно якого невідомі залежності замінюються на апроксимовані.

Локальне рішення (чисельний експеримент) математичної моделі чисельними методами було проведено з використанням програмного середовища Mathcad, результати наведено на рисунку 2.9: профіль швидкості в робочому зазорі та потужність дисипації в робочому зазорі.

При моделюванні руху процесу течії розплаву через робочий зазор рух

розплаву вздовж каналу є нехтовно малим, тому для спрощення розрахунків приймаємо наступне. Рух розплаву відбувається тільки в поперечному напрямі. Внаслідок цього тензор напружень складається тільки з однієї величини напруги (вздовж вісі x), даний вид зсуву називається одномірним.

Зробивши спрощення щодо одномірності зсуву у робочому зазорі змішувального елемента, рівняння рівноваги сил можна переписати в вигляді:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{d\tau_{yx}}{dy}. \quad (2.50)$$

Виразивши вираз напруження зсуву та проінтегрувавши, отримуємо:

$$\tau_{yx} = \frac{dP}{dx} \cdot y + C_1. \quad (2.51)$$

Для визначення сталої інтегрування скористаємось граничною умовою:

$$y = 0 \Rightarrow \tau_{yx} = \tau_{yx}(0). \quad (2.52)$$

Тоді:

$$\tau_{yx}(y) = \tau_{yx}(0) + \frac{dP}{dx} \cdot y. \quad (2.53)$$

Реологічні параметри розплаву знаходимо з відомого степеневого закону Освальда де Віля, вираженого через напруження зсуву, Па:

$$\tau_{yx}(y) = K \cdot \dot{\gamma}_x(y)^n. \quad (2.54)$$

Швидкість зсуву при неньютонівській поведінці течії розплаву, с^{-1} :

$$\dot{\gamma}_x(y) = \sqrt[n]{\frac{\tau_{yx}(y)}{K}}. \quad (2.55)$$

Швидкість зсуву, с^{-1} :

$$\dot{\gamma}_x(y) = \frac{dW_x}{dy}. \quad (2.56)$$

Звідси швидкість розплаву, м/с :

$$W_x(y) = \int_0^y \dot{\gamma}_x(y) dy. \quad (2.57)$$

Підставивши значення величини швидкості зсуву з рівняння (2.56) до

виразу (2.57), отримуємо:

$$W_x(y) = \int_0^y \sqrt[n]{\frac{\tau_{yx}(y)}{K}} dy. \quad (2.58)$$

Доповнивши вираз (2.8) виразом (2.4) та рівнянням нерозривності в інтегральній формі отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} W_x(y) = \int_0^y \sqrt[n]{\frac{\tau_{yx}(y)}{K}} dy; \\ \tau_{yx}(y) = \tau_{yx}(0) + \frac{dP}{dx} \cdot y; \\ Q = L \cdot \int_0^y W_x(y) dy; \end{cases} \quad (2.59)$$

Система трьох незалежних рівнянь (2.9), невідомими якої є напруження зсуву на стінці та по висоті каналу і градієнт тиску є невизначеною, тому для її розв'язання необхідно додати граничні умови швидкості, м/с:

$$\begin{cases} W_x(0) = 0; \\ W_x(h) = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}; \end{cases} \quad (2.60)$$

Для повного опису математичної моделі течії розплаву у робочих зазорах змішувального елементу необхідно виразити з рівняння збереження енергії (2.6), потужність дисипації в розплаві, Вт:

$$\Delta N_d = B \cdot L \cdot \int_0^h [\tau_{yx}(y) \cdot \dot{\gamma}_x(y)] dy. \quad (2.61)$$

Перегрів розплаву °C:

$$\Delta T = \frac{\Delta N_d}{G \cdot C_p}, \quad (2.62)$$

де G – масова продуктивність, кг/с; C_p – питома теплоємність розплаву полімеру, Дж/(кг·°C).

Розв'язок системи рівнянь (2.59) проводимо з застосуванням чисельних методів в програмному середовищі Mathcad, програму розрахунку якого наведено в додатку А.

Розрахунок математичної моделі процесу течії розплаву у робочих зазорах змішувального елемента проводиться за наступною методикою:

1. Розбиваємо висоту зазору на N – кількість вузлових точок.

$$i_k = N \quad (2.63)$$

2. Крок розрахунку по висоті зазору, м:

$$t = \frac{h}{i_k} \quad (2.64)$$

3. Сітка кінцево-різницевої схеми:

$$y = 0, t \dots h \quad (2.65)$$

4. Дотичні напруження, як функція напруження зсуву, градієнту тиску та висоти зазору для збігаючого та набігаючого на тиск зазору змішувального елемента:

$$\begin{aligned} \tau_{xn}(y, \tau_{xn0}, dP/dx) &= \tau_{xn0} + dP/dx \cdot y \\ \tau_{xz}(y, \tau_{xz0}, dP/dx) &= \tau_{xz0} - dP/dx \cdot y \end{aligned} \quad (2.66)$$

5. Швидкість в збігаючому від тиску та набігаючому на тиск зазорі, м/с:

$$\begin{aligned} W_{xn}(y, \tau_{xn0}, dP/dx_p) &= W_{y0} + \int_0^y \left(\left| \frac{\tau_{xn}(y, \tau_{xn0}, dP/dx)}{K} \right| \right)^{\left(\frac{1}{n}-1\right)} \cdot \frac{\tau_{xn}(y, \tau_{xn0}, dP/dx)}{K} dy \\ W_{xz}(y, \tau_{xz0}, dP/dx_p) &= W_{y0} + \int_0^y \left(\left| \frac{\tau_{xz}(y, \tau_{xz0}, dP/dx)}{K} \right| \right)^{\left(\frac{1}{n}-1\right)} \cdot \frac{\tau_{xz}(y, \tau_{xz0}, dP/dx)}{K} dy \end{aligned} \quad (2.67)$$

6. Отриману систему рівнянь (2.2) доповнюємо граничними умовами та рівнянням нерозривності потоку в інтегральній формі:

$$l \cdot \int_0^h (W_{xz}(y, \tau_{xz0}, dP/dx_p) - W_{xn}(y, \tau_{xn0}, dP/dx_p)) dy = V \quad (2.68)$$

7. Граничні умови:

$$\begin{cases} W_{x0} = 0; \\ W_{xh} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}; \end{cases} \quad (2.69)$$

Розв'язок системи рівнянь (2.66), (2.67) та (2.68) проводиться чисельними методами, за допомогою оператора «Given – Find» в програмі Mathcad.

Для розрахунку математичної моделі течії розплаву у робочих зазорах змішувального елемента для екструдера діаметром шнеку 63 мм з наступними вхідними даними (взято з натурального експерименту).

Вхідні дані:

глибина зазору $h = 0,002$ м;

діаметр циліндру $D = 0,063$ м;

частота обертання черв'яка $n = 80$ об/хв;

масова продуктивність розплаву $G = 120$ кг/год;

ширина зазору $B = 0,005$ м;

довжина зазору $L = 0,1$ м;

кількість каналів 6 шт;

кількість зазорів $n_z = 6$ шт.

Реологічні параметри розплаву:

коефіцієнт консистентності $K = 472$ Па·сⁿ;

показник степені $n = 0,728$;

теплоємність розплаву $C_p = 2720$ Дж/(кг·°C);

густина розплаву $\rho = 860$ кг/м³;

температура перед входом $T_0 = 200$ °C.

На рисунку 2.10 наведено епюри швидкості у збігаючому та набігаючому зазорах змішувального елемента.

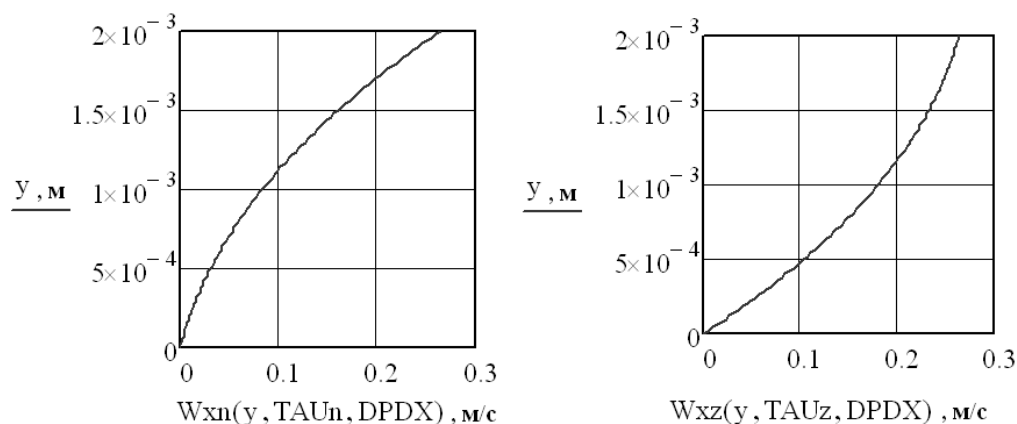


Рисунок 2.10 – Епюри швидкості у робочих зазорах змішувального елемента

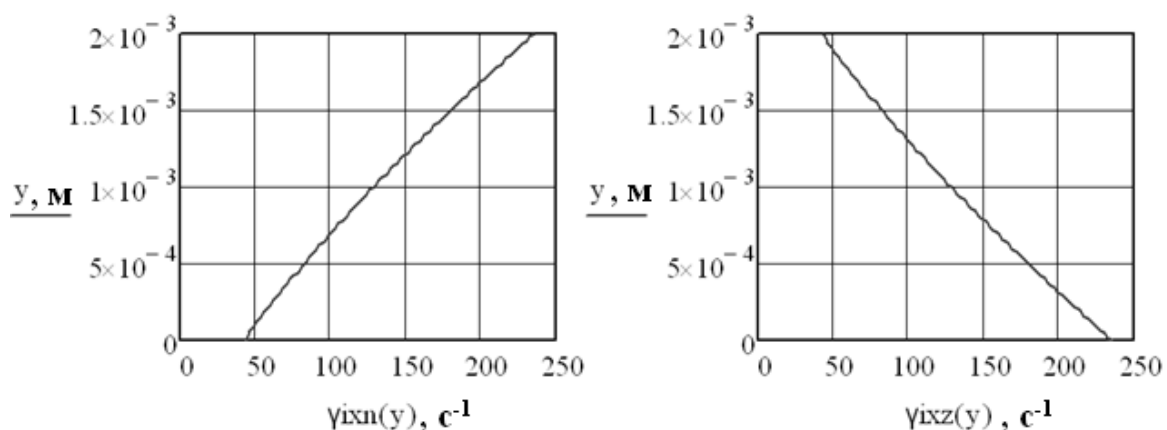


Рисунок 2.11 – Епюри швидкості зсуву у робочих зазорах змішувального елемента

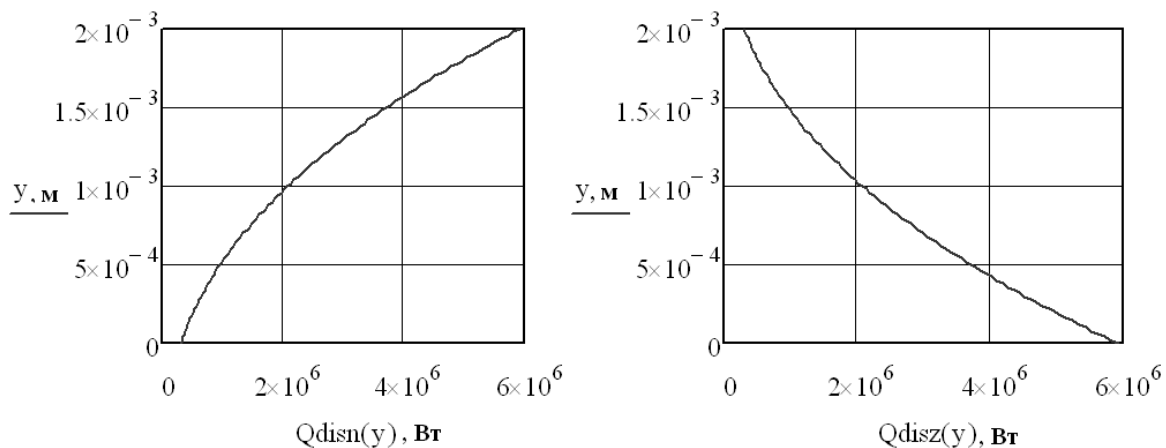


Рисунок 2.12 – Потужність дисипації у робочому зазорі змішувального елемента

В результаті розрахунку математичної моделі чисельними методами в

програмному середовищі Mathcad отримано наступні дані:

При проведенні чисельного експерименту було отримано такі значення:

Напруження зсуву в набігаючому та збігаючому зазорах змішувального елемента $\tau_{xn} = 7,237 \cdot 10^3$ Па; $\tau_{xz} = 2,515 \cdot 10^4$ Па; градієнт тиску, що діє на розплав $dP/dx = 8,594 \cdot 10^6$ Па/м.

Загальна потужність дисипації $N_{dsum} = 29,109$ Вт; відповідно перегрів розплаву у одній парі збігаючого та набігаючого зазору становить $0,321$ °С; середня швидкість зсуву в зазорах $\dot{\gamma}_{sr} = 201,983$ с⁻¹ та накопичена деформація зсуву (якість перемішування) $\gamma_{zm} = 93,801$.

Програму розрахунку математичної моделі процесу течії розплаву у робочих зазорах змішувального елемента наведено в додатку А.

2.5 Висновки

Обґрунтовано фізичну модель процесу змішування та диспергування в робочих каналах та зазорах змішувального елемента. Визначено параметри, що впливають на якість змішування неоднорідних сумішей з різнорідними реологічними характеристиками.

Розроблено та уточнено математичну модель процесу течії розплаву в робочих зазорах та каналах змішувального елемента. Проведено розрахунки математичної моделі процесу течії розплаву у робочих зазорах змішувального елемента чисельними методами в програмному середовищі Mathcad, та розв'язку математичної моделі течії у робочих каналах змішувального елемента. Також було проведено чисельний експеримент та визначено вплив основних геометричних параметрів змішувального елемента на якість проведення процесу, а саме глибину та довжину робочого зазору на величини накопиченої деформації зсуву, перепаду тиску та температури розплаву і визначено допустимі межі глибини робочого зазору при проектуванні

конструкції змішувального елемента. Згідно отриманих даних зменшення глибини та збільшення довжини зазору суттєво збільшує дисипативні тепловиділення в процесі течії розплаву, внаслідок чого це може призвести до термічної деструкції полімеру. Однак при збільшенні глибини каналу та зменшенні глибини зазору величина накопиченої деформації зсуву зменшується, внаслідок чого і знижується якість змішування.

Отримані дані мають бути експериментально перевірені для використання методики розрахунку при проектуванні нових конструкцій змішувальних елементів для переробки полімерних композиційних матеріалів.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ

3.1 Дослідження реологічних параметрів неньютонівських рідин методом капілярної віскозиметрії

Основною метою переробки композиції поліетилену та каучуку є досягти якомога рівномірного розподілу каучуку по всьому об'єму утвореної композиції. Саме цим регламентується якість виробу, який буде виготовлятися з цих гранул.

Якість змішування та диспергування при екструзії високов'язких розплавів, якими є більшість полімерів та їх композицій визначається накопиченою деформацією в розплаві при його течії у робочих каналах змішувального елемента. Як вже зазначалося раніше внаслідок високої в'язкості розплаву, розплав рухається ламінарною течією. При даному процесі сили під якими рухається розплав урівноважуються силами внутрішньої реакції матеріалу. Природа і величина внутрішньої реакції матеріалу визначається силами міжатоми (міжмолекулярної) взаємодії [10, с. 21]. Тому при прикладенні зовнішньої сили до рідини деформація розвивається необмежено, причому сили внутрішнього тертя обмежують тільки швидкості деформації.

При математичному описі процесу течії розплаву полімерної композиції необхідно врахувати властивості середовища.

В випадку незмінної залежності швидкості деформації від прикладеної сили на розплав, то така рідини називаються ньютонівськими. Тобто залежність напружень зсуву від швидкості зсуву для ньютонівських рідин є лінійною та описується рівнянням Ньютона $\tau = \mu \dot{\gamma}$. Однак деякі рідини, особливо при збільшенні величини швидкості зсуву мають нелінійну залежність величини напруження зсуву від швидкості зсуву, внаслідок чого даний клас рідин, ще називають нелінійними рідинами [10, с. 176]. До цього класу рідин відносять

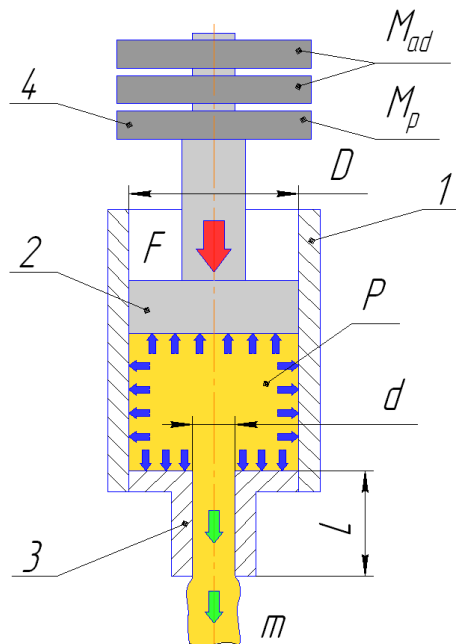
більшість розплавів полімерів, оскільки їх в'язкість зменшується з збільшенням величини швидкості зсуву

Внаслідок того, що досить точного математичного опису процесу диспергування та змішування гетерофазних систем не винайдено або розрахунки є досить громіздкими та складними, тому використовуються експериментальні методи дослідження.

Для розв'язку математичної моделі даного процесу було проведено експериментальні дослідження для визначення реологічних властивостей розплаву полімеру, який переробляється в одночерв'ячному екструдері зі змішувальним елементом. Оскільки більшість полімерів є неньютонівськими псевдопластичними рідинами, течія розплаву яких досить точно описується степеневим законом Освальда де Віля.

3.2 Опис експериментальної установки

Схему дослідної установки наведено на рисунку 3.1.



1 – циліндр; 2 – поршень; 3 – капіляр; 4 – вантаж

Рисунок 3.1 – Схема дослідної установки

Експериментальні дослідження капілярної віскозиметрії було проведено на дослідній установці, загальний вигляд якої наведено на рисунку 2.14.



1 – станина; 2 – корпус капіляр; 3 – вантаж; 4 – подрібнений полімер; 5 – термометр; 6 – щит керування

Рисунок 3.2 – Загальний вигляд дослідної установки

Дослідна установка складається з станини 1, на якій розміщуються капіляр, з зовнішнім електронагрівом. Для захисту персоналу від можливих термічних ушкоджень капіляр розміщено в циліндричному корпусі 2. Нагрів розплаву до відповідної температури експерименту проводиться за допомогою електронагрівачів резисторного чи індукційного нагріву, керування ними відбувається завдяки щиту керування 6. Для перевірки температури до необхідної величини, використовують ртутний (або інших типів) термометр 5. Матеріал, який досліджується за необхідності подрібнюється, далі засипається до необхідного рівня в циліндр віскозиметра. Далі досліджуваний матеріал

утрамбовується спеціальним інструментом та встановлюється поршень на якому встановлюються вантажі Z для створення тиску в капілярі.

Експеримент проводиться з наступними етапами:

- Встановлюється температура нагріву розплаву на щиті керування;
- Завантажується досліджуваний матеріал до циліндру віскозиметра;
- Встановлюється поршень з відповідним вантажем;
- Виконуються заміри часу витіснення розплаву з капіляру;
- Визначається маса витісненого матеріалу на електронних вагах;
- Проводиться обробка експериментальних даних та будуються

залежності об'ємних витрат розплаву від тиску.

Основними величинами, що вимірюються є час витіснення розплаву з капіляру, вага вантажу та маса витісненого розплаву. З маси вантажу, який тисне на поршень визначається тиск, що діє на розплав. З визначених маси витісненого розплаву та часу витіснення з застосуванням відомих залежностей знаходимо об'ємну витрату розплаву через капіляр.

Визначені експериментальні дані застосовуються для визначення реологічних параметрів досліджуваного розплаву полімеру. Визначаються коефіцієнт консистентності та степінь неньютонівської поведінки розплаву.

Отримані параметри ступеневої реологічної залежності використано для розв'язання математичної моделі процесу течії розплаву в робочих зазорах змішувального елемента.

3.3 Методика визначення реологічних параметрів розплаву

Основною задачею при проведенні експериментальних досліджень було визначення показників степеню неньютонівської поведінки розплаву та коефіцієнта консистентності.

Для визначення реологічних параметрів досліджуваної композиції, а саме параметри течії розплаву розроблено методику обробки даних капілярної віскозиметрії.

Напруження в розплаві, що тече в каналі капіляру:

$$\tau(R) = \frac{P \cdot \pi \cdot R^2}{4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot L} = \frac{P \cdot R}{8 \cdot L} \text{ Па}, \quad (3.1)$$

$$\tau(r) = \frac{P \cdot \pi \cdot r^2}{4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L} = \frac{P \cdot r}{8 \cdot L} \text{ Па}, \quad (3.2)$$

де R – радіус капіляру, м;

r – поточний радіус капіляра, м;

P – тиск, що діє на розплав, м;

L – довжина капіляру, м.

Степеневий закон поведінки Неньютонівської рідини напружень зсуву розплаву композиції полімеру:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \Rightarrow \dot{\gamma} = \sqrt[n]{\frac{\tau}{K}} \quad (3.3)$$

де τ – напруження зсуву, Па;

$\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с^{-1} ;

K – коефіцієнт консистентності, $\text{Па} \cdot \text{с}^n$;

n – степінь неньютонівської поведінки розплаву.

Звідси

$$\dot{\gamma}(r) = \sqrt[n]{\frac{P \cdot r}{8 \cdot L \cdot K}}. \quad (3.4)$$

Оскільки

$$\dot{\gamma}(r) = \frac{dW_x}{dr}. \quad (3.5)$$

$$W(r) = \int_R^0 \dot{\gamma}(r) dr \quad Q = \int_R^0 W(r) \cdot 2\pi r \cdot dr \quad (3.6)$$

Тоді

$$Q = 2\pi \int_R^0 \left[\int_R^0 \sqrt{\frac{P \cdot r}{8L \cdot K}} dr \right] \cdot r \cdot dr. \quad (3.7)$$

В рівнянні (3.7) невідомими є показник ступеня Неньютонівської поведінки n та коефіцієнт консистентності K , тому коренем буде залежність $K = f(n)$.

Розв'язок було проведено за допомогою чисельних методів в програмному середовищі Mathcad наведеної в додатку Б.

3.4 Результати експерименту

Метою дослідження є знаходження реологічних параметрів розплаву композиції.

В ході проведення обробки даних капілярної віскозиметрії було визначено коефіцієнт консистентності та степінь неньютонівської поведінки розплаву. Отримані результати були використані для розв'язання математичної моделі течії розплаву у робочих зазорах змішувального елемента.

В ході експерименту було отримано залежності об'ємної витрати розплаву через капіляр для температур розплаву $T_1 = 180^\circ\text{C}$ та $T_2 = 165^\circ\text{C}$. графік залежності об'ємної витрати розплаву від тиску, що діє на розплав полімеру наведено на рисунку 3.3.

Отримані результати експерименту капілярної віскозиметрії наведено в таблиці 3.1.

Для визначення основних параметрів процесу необхідно визначити геометричні розміри капіляру.

Геометричні розміри капіляру:

Діаметр поршня:

$$d_{\pi} = 0,0095 \text{ м};$$

Довжина капіляру:

$$l_k = 0,0082 \text{ м};$$

Внутрішній діаметр капіляру:

$$d_k = 0,0013 \text{ м.}$$

Таблиця 3.1 – Результати експериментальних дослідів дослідження реологічних параметрів течії розплаву каучуку через капіляр

T ₁ = 180 °C						
№ досл.	Маса вантажув., кг	Час, с	Маса розплаву, г	Густина, кг/м ³	Об'ємна витрата, м ³ /с·10 ⁻¹¹	Тиск, Па
1	1,175	669	0,247	780	47,33432985	162619,6
2	2,375	388	0,263	780	86,90192969	328699,2
3	2,795	272	0,218	780	102,7526395	386827,1
4	3,755	251	0,276	780	140,9745633	519690,8
5	4,955	192	0,272	780	181,6239316	685770,4
6	4,955	132	0,25	780	242,8127428	685770,4
7	5,395	138	0,273	780	253,6231884	746666,2
T ₂ = 165°C						
№ досл.	Маса вантажув., кг	Час, с	Маса розплаву, г	Густина, кг/м ³	Об'ємна витрата, м ³ /с·10 ⁻¹¹	Тиск, Па
1	1,175	1320	0,076	782	7,381507382	162619,6
2	2,135	602	0,235	782	50,04685237	295483,3
3	3,755	353	0,32	782	116,2199462	519690,8
4	5,395	249	0,268	782	137,9878488	746666,2
5	6,595	239	0,314	782	168,436863	912745,8
6	6,595	245	0,29	782	151,7530089	912745,8

За результатами експерименту побудовано графік, зображено на рисунку 3.3, де визначено емпіричні залежності об'ємної витрати від тиску.

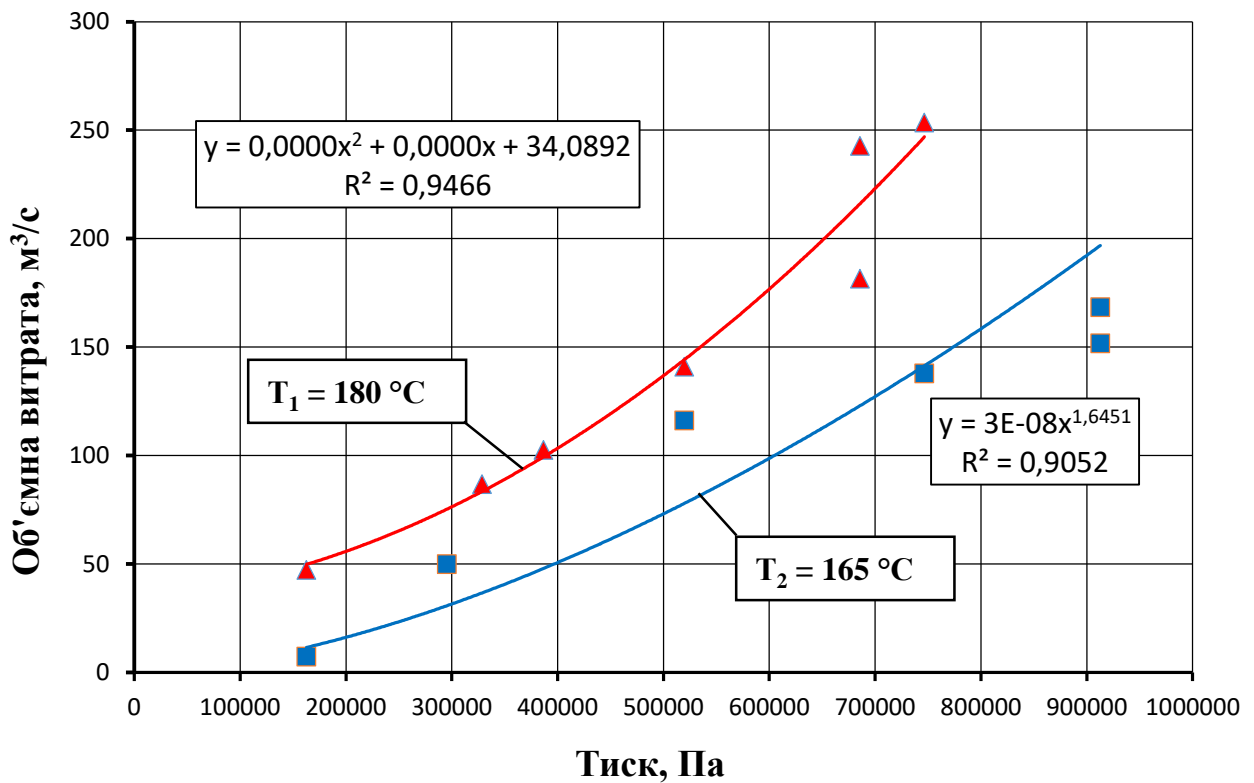


Рисунок 3.3 – Залежності об'ємної витрати від тиску, що діє на розплав полімеру

Згідно отриманих експериментальних даних було визначено реологічні характеристики розплаву композиції поліетилену та каучуку, а саме коефіцієнт консистентності $K = 472 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ та показник степеню консистентності $n = 0,728$.

Отримані реологічні характеристики розплаву було використано для розрахунку математичної моделі течії розплаву у робочих зазорах змішувального елемента.

Також в ході проведення експериментальних досліджень було визначено залежність об'ємної витрати розплаву від тиску, який діє на розплав. При збільшенні тиску та збільшенні температури розплаву зростає текучість розплаву.

Також було проведено розрахунки похибок прямого та непрямого вимірювання експерименту та визначено, що точність вимірювання знаходяться

в допустимих межах та отримані результати можна застосовувати для подальших досліджень. Методика розрахунку похибок прямого та непрямого вимірювання наведена в додатку В.

3.5 Дослідження якості змішування

Якість виробів виготовлених з полімерів в основному характеризується фізико-механічними властивостями матеріалу. Основними фізико механічними властивостями полімерів є допустимий розтяг матеріалу та стиск, ударна міцність, еластичність тощо. До теплофізичних властивостей відносять температури плавлення, склування, деструкції та кристалізації.

Також важливими є експлуатаційні властивості матеріалів, а саме колір, однорідність, вміст дефектів (порожнини, подряпини тощо).

Полімерні композиційні матеріали є неоднорідними сумішами компонентів, що надають нові властивості отриманому матеріалу. Якість таких матеріалів суттєво залежить від якості розподілення

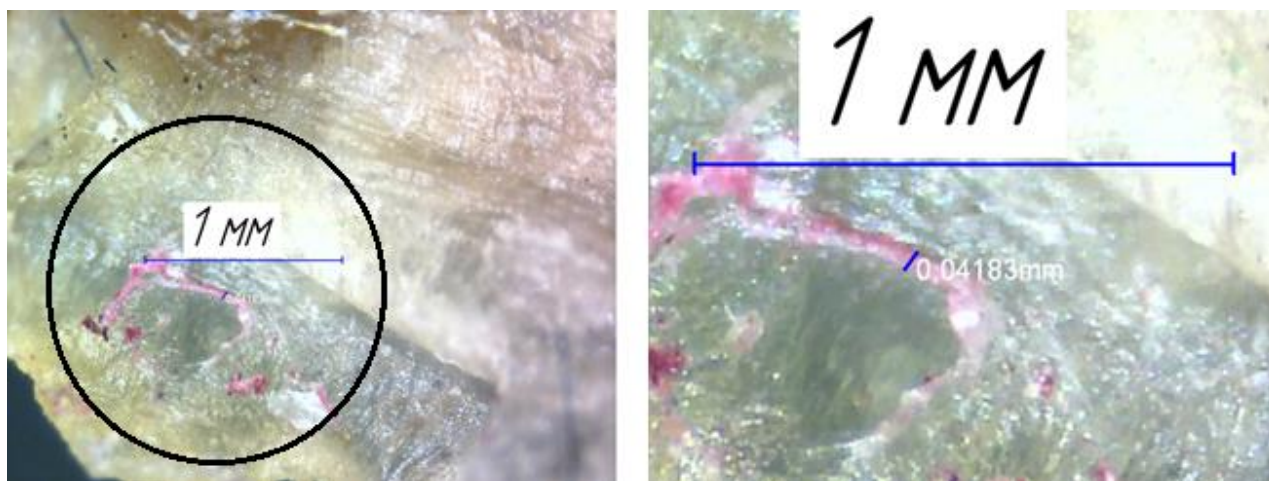


Рисунок 3.4 – Структура полімерної композиції

Дослідження поверхневої структури розрізу гранули полімерної композиції було проведено на цифровому USB мікроскопі Magnifier HD 300X

(MG578) з збільшенням 20х – 300х, світлодіодною підсвіткою, роздільною здатністю камери 2 Мп.

В досліджуваній області полімеру визначалась кількість агломератів каучуку, та розміри.

Було визначено агломерати можна представити як полоси диспергованої фази в дисперсному середовищі. Мінімальні довжини полос було порівняно з отриманими величинами довжини полос агломератів в ході розрахунку математичної моделі процесу течії розплаву у робочих зазорах змішувального елементу.

Методика дослідження морфології полімеру:

1. Дослідний зразок гранули очищався від зовнішнього шару;
2. Оброблений зразок гранули очищався від можливих забруднень та пилу та поміщаємо на дослідному стенді мікроскопу;
3. Обиралася досліджувана область та проводився її морфологічний аналіз.

Для оцінки гомогенності якості суміші було обрано ряд однакових проб.

При мікроскопічному аналізі було експериментально визначено середню довжину полос диспергованої фази у дисперсному середовищі.

Для обраного для аналізу агломерату каучуку було при мікроскопічному аналізі встановлено довжину полоси агломерату диспергованої фази у дисперсному середовищі $r_{\text{exp}} = 0,04183$ мм.

Отримане величина порівнювалася з значеннями, отриманими в ході розрахунку математичної моделі процесу течії розплаву у робочих зазорах змішувального елементу, програма розрахунку якого наведена в додатку А.

Для статистичної оцінки з літератури було обрано величину критерію якості змішування $I = 0,975$.

Отримані величини середньої швидкості зсуву з розрахунку математичної моделі було використано для розрахунку ефективної в'язкості розплаву та визначенню середньої довжини полос після проходження робочого зазору.

Для цього визначалися об'ємна концентрація диспергованої фази у дисперсному середовищі q .

Методика оцінки якості змішування :

Середня швидкість зсуву:

$$\dot{\gamma}_{sr} = \int_0^h [\dot{\gamma}_{xn}(y) + \dot{\gamma}_{xz}(y)] dy = 201,983 \text{ c}^{-1}.$$

де $\dot{\gamma}_{xn}(y), \dot{\gamma}_{xz}(y)$ – функції швидкості зсуву у робочих зазорах від висоти зазору у збігаючому та набігаючому зазорах, c^{-1} .

В'язкості дисперсного середовища та дисперсної фази визначалася з експериментів та літератури.

Накопичена деформація зсуву визначалася з відомих залежностей:

$$\Gamma_{zm} = \int_0^t \dot{\gamma}_{sr} dt = 201,983 \cdot 0,464 = 93,801,$$

де t – середній час перебування розплаву у робочих зазорах, с.

Визначаємо мінімально допустиму деформацію зсуву для забезпечення заданого критерію змішування I :

Для оцінки якості було обрано критерій змішування I_1 , що знаходиться в межах від 0 до 1. Значення індексу $I_1 = 0$ відповідає повністю не змішуваній системі, при $I_1 = 1$ система володіє властивостями ідеальної суміші.

Для даних полімерних композиційних матеріалів для отримання якісного змішування неоднорідної системи необхідно досягти значення індексу змішування $I_1 = 0,975$ [16, с. 41].

Мінімальне значення деформації зсуву для компонентів:

$$\gamma_{\min} = \frac{2,1 \cdot \mu_2}{q \cdot \mu_1} \cdot \left[\frac{I_1}{q \cdot (q-1)} \right]^{\frac{1}{3}} = \frac{2,1 \cdot 32,145}{q \cdot 111,403} \cdot \left[\frac{0,975}{0,1 \cdot (0,1-1)} \right]^{\frac{1}{3}} = 13,408.$$

Отримане значення накопиченої деформації зсуву повинне бути більшим ніж мінімальне для забезпечення заданого критерію змішування.

$$\Gamma_{zm} \geq \gamma_{\min} \Rightarrow 93,801 > 13,408.$$

Звідси середня ширина полос під дією деформацій зсуву:

$$r = \left(\frac{r_0}{\Gamma_{zm}} \cdot q \right) \cdot \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \right) = \left(\frac{0,01}{93,801} \cdot 0,1 \right) \cdot \left(\frac{111,403}{32,145} \right) = 3,695 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Похибка між експериментом та емпіричними результатами математичного моделювання:

$$\delta = \left| \frac{r - r_{\text{exp}}}{r} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{3,695 \cdot 10^{-5} - 0,04183 \cdot 10^{-3}}{3,695 \cdot 10^{-5}} \right| \cdot 100\% = 13,217\%.$$

Отримані значення деформації зсуву дозволяють перемішати неоднорідну суміш полімерів до заданого критерію якості змішування, отримана величина накопиченої деформації зсуву більша за мінімально допустиму значення деформації зсуву.

Дана методика дозволяє визначити мінімально допустимі величини накопиченої деформації зсуву для отримання якісної структури полімеру. Для спрощення розрахунків розраховані величини середньої ширини полос відповідають величинам отриманим експериментальним значенням в ході проведення мікроскопії структури отриманих гранул.

3.6 Віртуальне дослідження

Вхідні дані віртуального експерименту відповідають вхідним даним чисельного експерименту при глибині зазору $h = 2$ мм, довжині зазору $L = 100$ мм та температурі розплаву 180 °C.

Метою експерименту є отримання швидкісних та температурних полів у робочих зазорах змішувального елемента з врахуванням реологічних властивостей досліджуваної композиції.

Реологічні властивості поліетилен-каучукової композиції було підставлено в стимуляційний експеримент у в програмному середовищі SolidWorks. Геометричну модель віртуального експерименту наведено на рисунку 3.5.

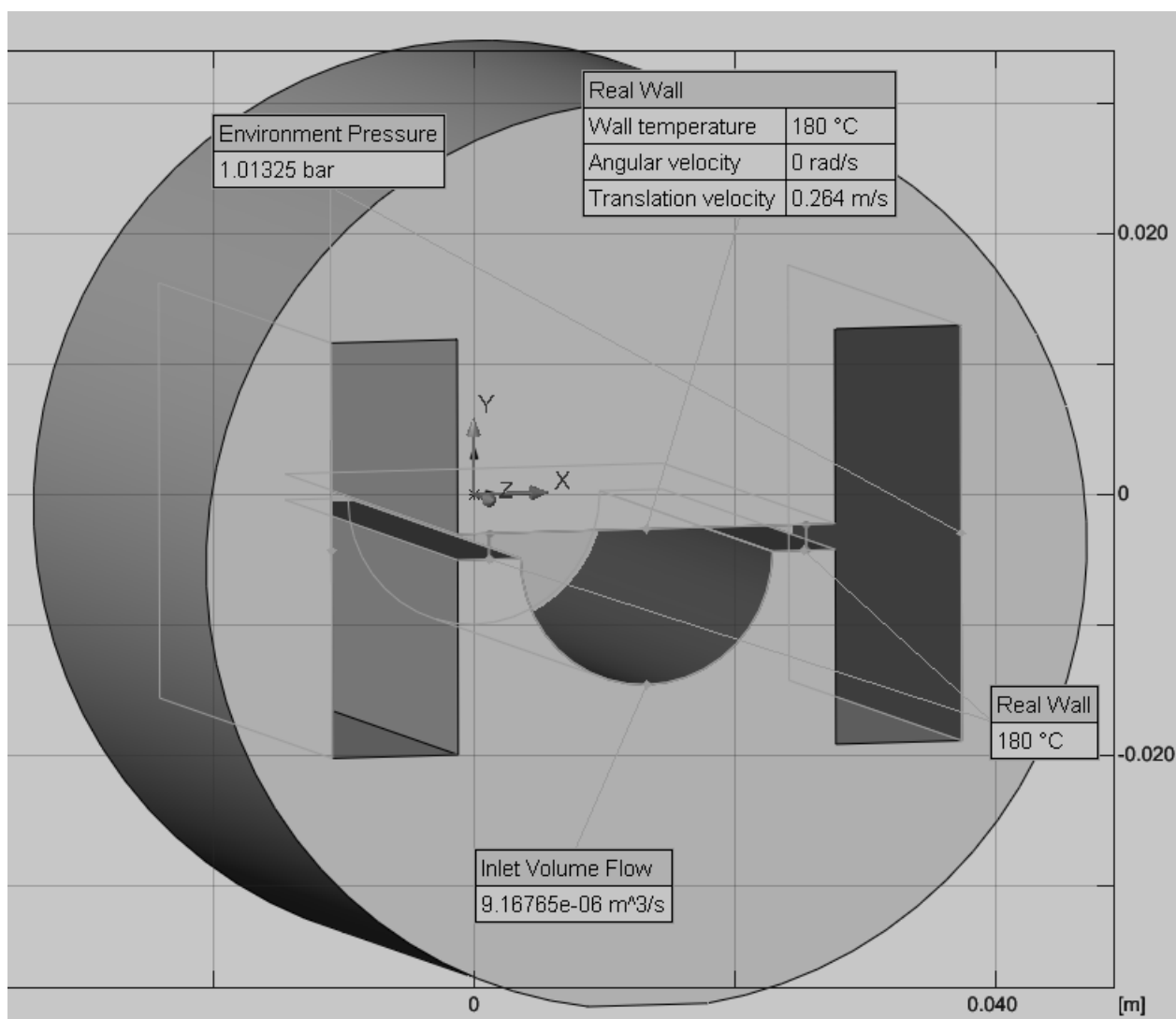


Рисунок 3.5 – Геометрична модель віртуального експерименту

В ході віртуального експерименту отримано результати, які наведено на рисунках 3.6, 3.7, 3.8, 3.9.

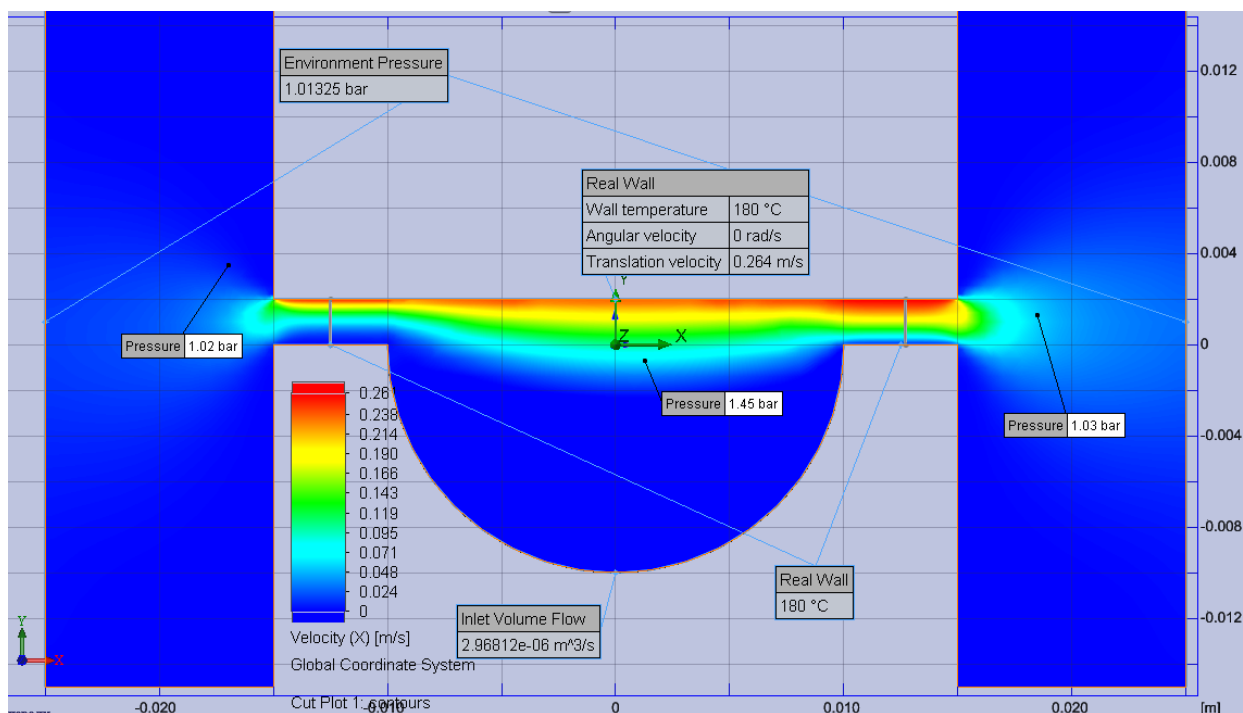


Рисунок 3.6 – Швидкості розплаву у збігаючому та набігаючому зазорі змішувального елементу

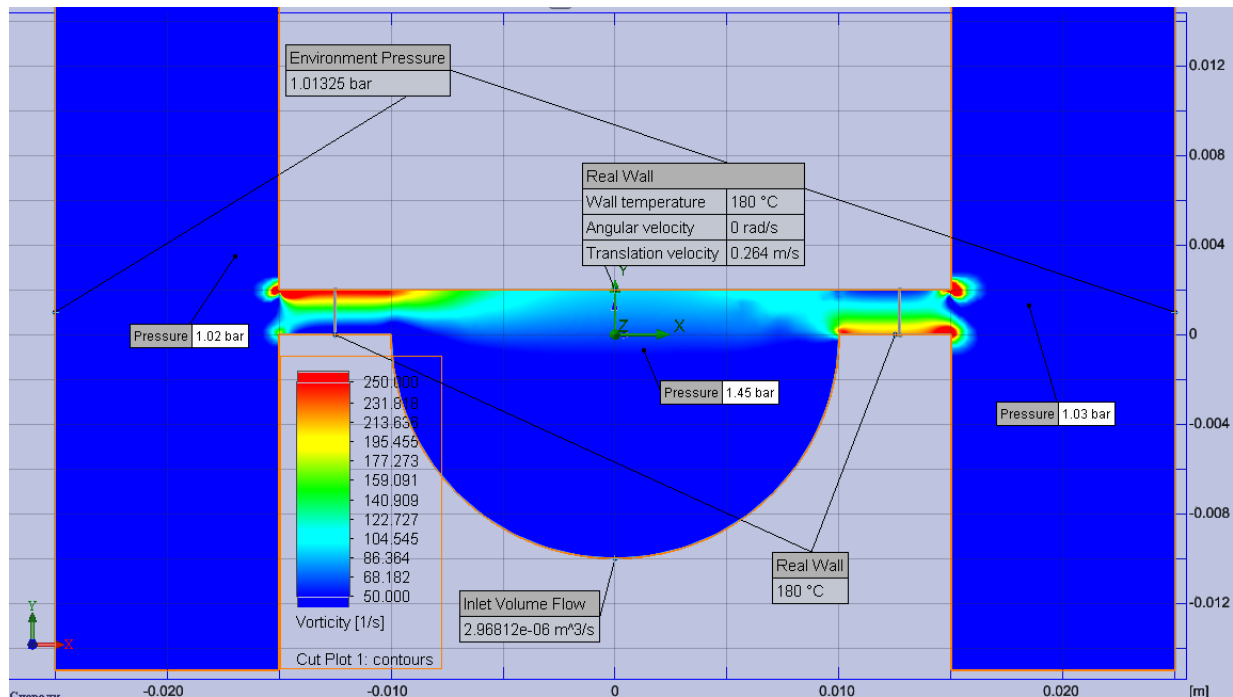


Рисунок 3.7 – Швидкості зсуву розплаву у збігаючому та набігаючому зазорі змішувального елементу

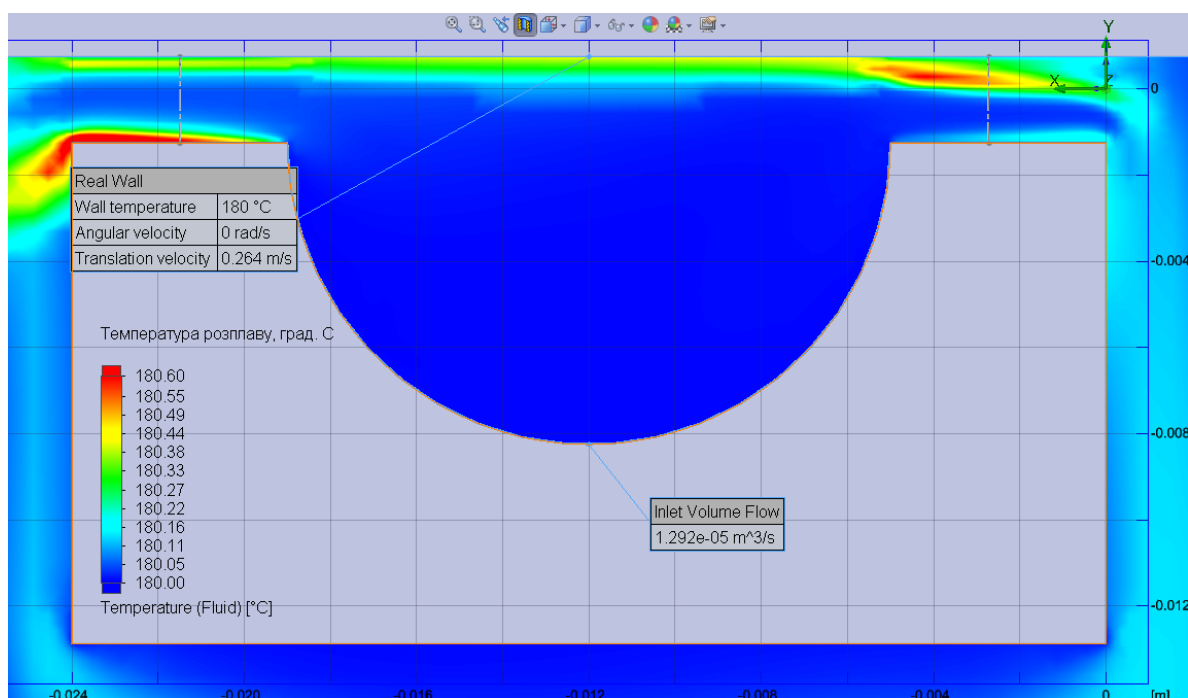


Рисунок 3.8 – Температура розплаву у збігаючому та набігаючому зазорі змішувального елементу

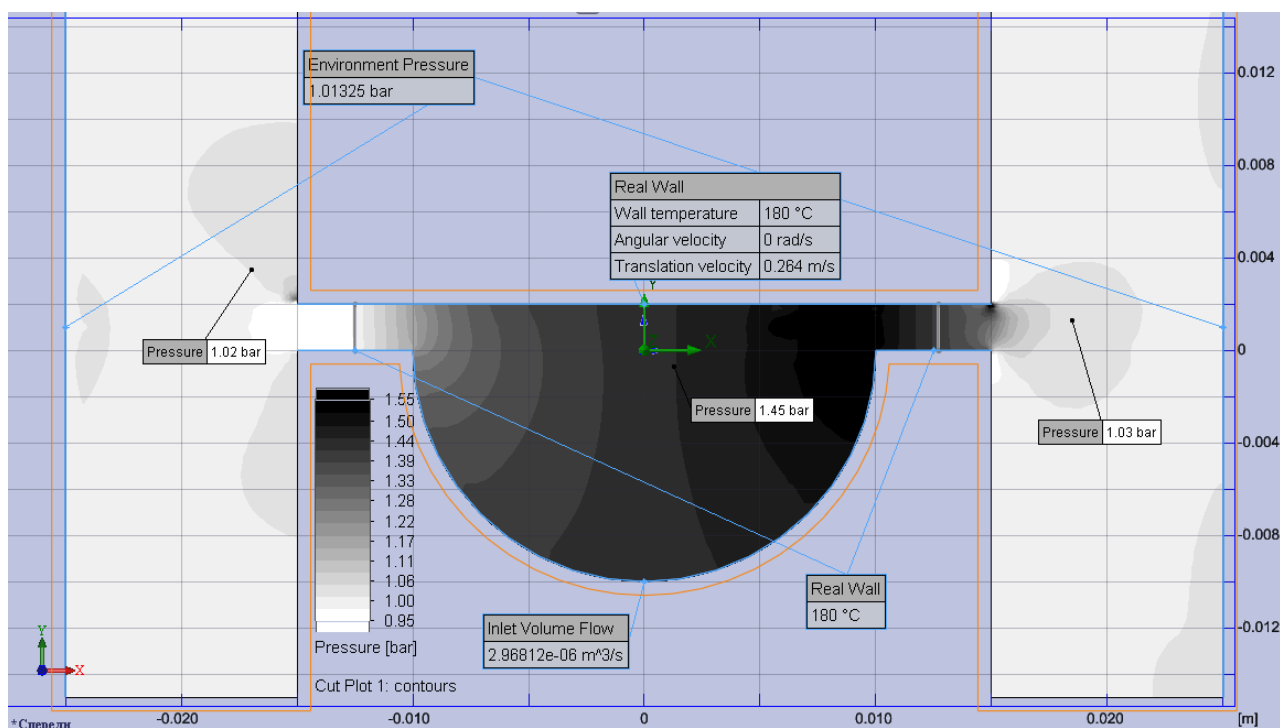


Рисунок 3.9 – Тиск у змішувальному елементі

Отримані дані у збігаючому та набігаючому зазорі змішувального елементу було порівняно з теоретичними розрахунками математичної моделі течії розплаву у робочих зазорах змішувального елементу та порівняно з величинами швидкостей, та швидкостей зсуву.

Отримані значення профілю швидкості у робочих зазорах (збігаючому та набігаючому) в ході проведення віртуального експерименту в програмному середовищі Solidworks. Результати віртуального експерименту наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати віртуального експерименту.

у, м	$W_{\text{хн}}$, м/с	$W_{\text{хз}}$, м/с
0	0	0
0,0002	0,005161927	0,016452453
0,0004	0,009173933	0,021702828
0,0005	0,014188942	0,0456852
0,0006	0,020252936	0,054694535
0,0007	0,027423795	0,06270545
0,0008	0,045199182	0,099835519
0,0009	0,067729425	0,116872687
0,001	0,095410079	0,148059638
0,0011	0,128570773	0,175598063
0,0012	0,147340535	0,199622967
0,0013	0,167658883	0,220441405
0,0014	0,189508521	0,238068534
0,0015	0,219140924	0,254110029
0,0016	0,237810445	0,258671313
0,0017	0,243942609	0,260035667
0,0019	0,263458	0,262345
0,002	0,264	0,264

З отриманих результатів віртуального дослідження побудовано залежність швидкості по висоті зазору.

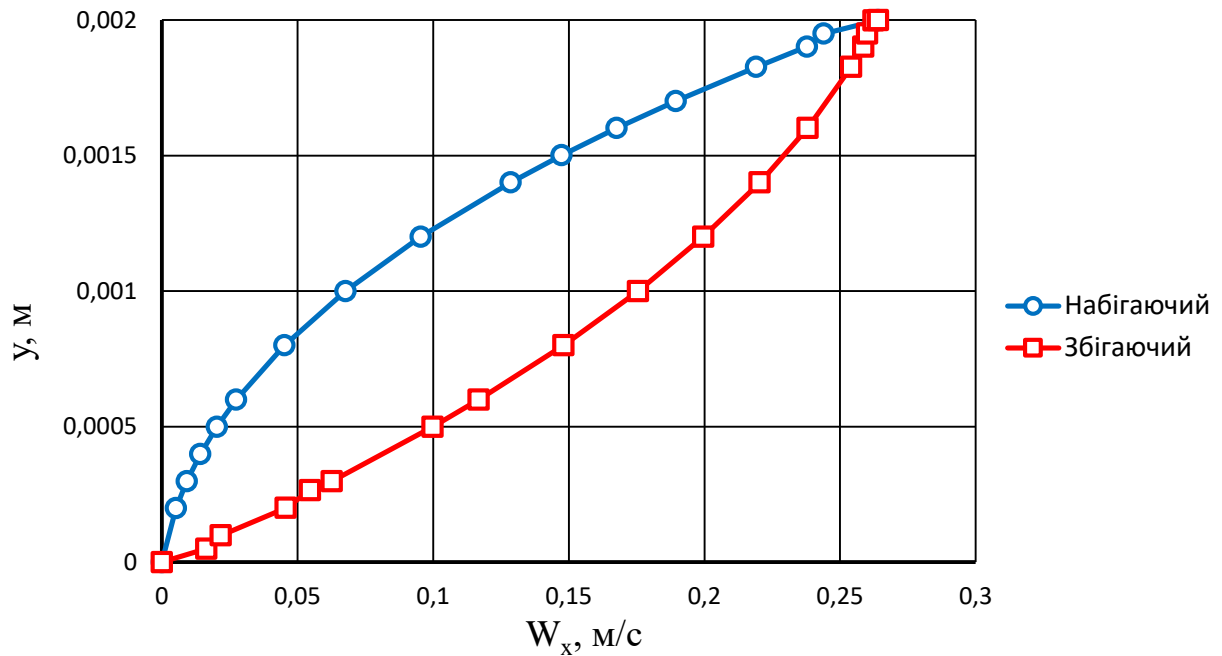


Рисунок 3.10 – Швидкості у змішувальному елементі, отримані в ході віртуального експерименту

В ході проведення віртуального експерименту було отримано величини швидкості, та швидкості зсуву, перепаду тиску та перегріву розплаву від дисипативних тепловиділень у розплаві. Надалі отримані результати основних параметрів процесу течії розплаву у робочих зазорах змішувального елементу використано для перевірки адекватності математичної моделі.

3.7 Перевірка адекватності математичної моделі

Для перевірки відповідності результатів розрахунку математичної моделі течії розплаву у робочих зазорах змішувального елементу дійсним значенням, для перевірки адекватності математичної моделі було використано результати віртуального експерименту в програмному середовищі Solidworks, припускаючи,

що результати розрахунків програми в достатній мірі точності відповідають дійсним значенням.

Для перевірки адекватності математичної моделі процесу течії розплаву у робочих зазорах змішувального елемента обрано значення величин швидкості розплаву у робочому зазорі в ході розрахунку математичної моделі та віртуального експерименту, результати яких наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати розрахунків математичної моделі та віртуального експерименту.

у, м	Збігаючий зазор W_{xz} , м/с		Набігаючий зазор W_{xn} , м/с	
	Віртуальний експеримент	Математична модель	Віртуальний експеримент	Математична модель
0	0	0	0	0
0,0002	0,005161927	0,009993	0,016452453	0,045
0,0004	0,009173933	0,023	0,021702828	0,085
0,0005	0,014188942	0,031	0,0456852	0,104
0,0006	0,020252936	0,04	0,054694535	0,121
0,0007	0,027423795	0,049	0,06270545	0,137
0,0008	0,045199182	0,06	0,099835519	0,153
0,0009	0,067729425	0,071	0,116872687	0,167
0,001	0,095410079	0,083	0,148059638	0,18
0,0011	0,128570773	0,097	0,175598063	0,193
0,0012	0,147340535	0,111	0,199622967	0,204
0,0013	0,167658883	0,126	0,220441405	0,215
0,0014	0,189508521	0,143	0,238068534	0,224
0,0015	0,219140924	0,16	0,254110029	0,233
0,0016	0,237810445	0,179	0,258671313	0,241
0,0017	0,243942609	0,198	0,260035667	0,248
0,0019	0,263458	0,241	0,262345	0,259
0,002	0,264	0,264	0,264	0,264

Для аналізу відповідності отриманих значеннях в ході розрахунку математичної моделі в програмному забезпеченні Mathcad та віртуального експерименту в програмному середовищі Solidworks побудуємо графіки залежності швидкості від висоти каналу, результати яких наведено на рисунку 3.11.

Отримані результати математичної моделі процесу течії розплаву у робочих зазорах змішувального елементу в достатній для проведення розрахунків точності відповідають отриманим значенням швидкостей в ході проведення віртуального експерименту.

Похибка результатів становить не більше 32,254 %, що є допустимим для моделювання процесу екструзії, тому робимо висновок, що математична модель процесу течії розплаву є адекватною.

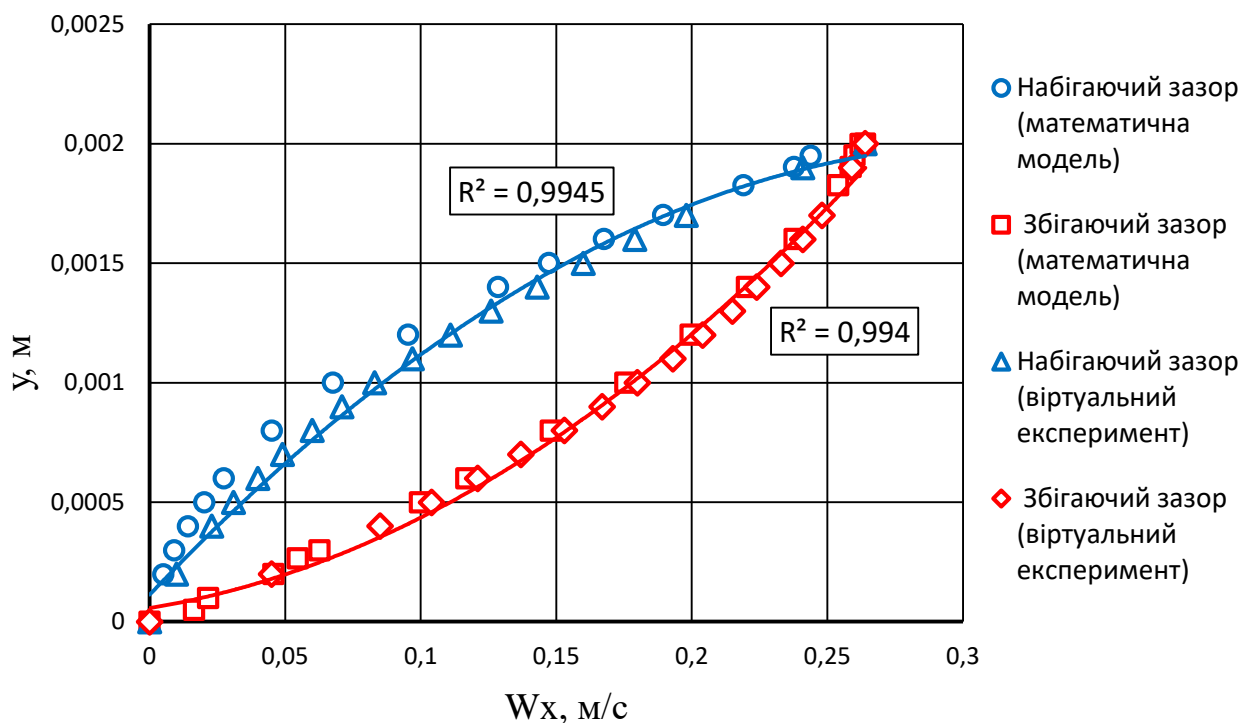


Рисунок 3.11 – Результати величин швидкості потоку при розрахунку математичної моделі та віртуального експерименту

3.8 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Науково-технічний розвиток призводить до появи принципово нових нововведень у будь-яких сферах матеріального виробництва, суттєво змінюючи технологічні процеси та матеріали, що використовуються, предмети та знаряддя праці. В свою чергу зміни технології та устаткування призводять до зміни умов праці та трудового процесу в цілому.

Апарати, що вводяться в експлуатацію, як і все інше обладнання, повинно відповідати всім вимогам техніки безпеки і охорони праці, які сформульовані в галузевих стандартах, а також в затверджених інстанціями інструкціях, правилах і нормах. Темою магістерської дисертації є «Процес екструзії полімер–каучукових композицій». Контроль параметрів технологічного процесу здійснює оператор лінії, пульт якого знаходиться в виробничому приміщенні, та допоміжний персонал в складі трьох чоловік в приміщенні площею 800 м² і об'ємом 4800 м³ та висотою 6 м.

Шкідливими і небезпечними виробничими факторами при роботі та обслуговуванні виробничої схеми є :

- повітря робочої зони;
- ураження електричним струмом;
- небезпека впливу елементів устаткування нагрітих до високих температур;
- виробничий шум та вібрація;
- пожежонебезпека.

3.8.1 Повітря робочої зони

Виходячи з прийнятої технологічної схеми маємо приміщення без надлишкового тепловиділення, тобто $Q < 20 \text{ ккал}/(\text{год} \cdot \text{м}^3)$ або $Q < 23,27 \text{ Дж}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$.

Категорія робіт оператора середньої складності, так як показник енерговитрати складає до 273 Дж/с. Параметри повітря робочої зони представлені в таблиці 3.1, в якій вказані також оптимальні умови.

В процесі виробництва гранул полімер-каучукових композицій в повітря робочої видаляються шкідливі речовини, такі як: речовини, які виділяються термічній деструкції поліетилену та каучуку, речовини що входять в склад суміші, а саме формальдегіди, ацетальдегіди, етилен, двоокис і окис вуглецю.

Гранично допустима концентрація (ГДК) цих речовин наступна:

- формальдегід – 2 мг/м³;
- ацетальдегід – 4 мг/м³;
- окис вуглецю – 1 мг/м³.

Фактична концентрація цих речовин, становить приблизно:

- формальдегід – 2 мг/м³;
- ацетальдегід – 4 мг/м³;
- окис вуглецю – 0,08 мг/м³.

Фактична концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони відповідають ГОСТ 12.1.005-88/98.

Параметри повітря робочої зони відповідають ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Забезпечення параметрів здійснюються в зимовий час за допомогою водяного опалення з температурою теплоносія 70 – 90 °С, а в теплий час року вентиляцією та кондиціонуванням.

Для відводу цих речовин в конструкції лінії передбачена місцева вентиляція відкритого типу. До місцевих відсмоктувачів відкритого типу належать витяжні, зонти, всмоктувальні панелі, бортові відсмоктувачі. Витяжні зонти передбачені для вловлювання потоків шкідливих речовин, які направлені вгору. Їх доцільно використовувати у випадку, коли джерело утворення пилу,

парів та газів переміщується по площині робочого місця як в горизонтальній, так, і у вертикальній площинах.

Параметри повітря робочої зони наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Параметри повітря робочої зони

Сезон року	Категорія робіт	Фактична температура, °C	Фактична відносна вологість, %	Фактична швидкість руху повітря, м/с
Холодний період року	Легка I	17 – 20	40 – 65	0,2
Теплий період року	Легка I	20 – 25	40 – 70	0,2

При проектуванні штучної (механічної) загальнообмінної вентиляції, яка призначена для вилучення з приміщення надлишків тепла, вологи та інших шкідливих виділень необхідно приймати розрахункові параметри згідно з СНИП2.04.05 – 91.

Розрахунок механічної вентиляції повинен включати визначення найбільш раціонального способу вилучення або попередження утворення токсичних, пожежо - чи вибухонебезпечних концентрацій пароповітряних сумішей (загальнообмінні або місцеві вентиляційні установки і системи); визначення необхідної кількості повітря для загальнообмінної вентиляції виходячи із відомої кратності повітрообміну в приміщенні, кількості шкідливих речовин, які вилучаються з приміщення, або надлишкового тепла, які відповідають санітарно - допустимим нормам ГОСТ 12.1.005 – 88/98.

Для видалення шкідливих парів та газів в цеху поблизу двох одночерв'ячних екструдерів встановлюється загальнообмінна вентиляція. Оскільки надлишкове тепловиділення не суттєво впливає на повітря робочої зони, розрахунок загальнообмінної вентиляції проводимо за забруднюючими речовинами.

Вихідними даними є: розмір приміщення 15х30х6 м, у цеху встановлено 2 екструдера, 2 гранулятори, 2 сушарки та ванна охолодження загальною потужністю 200 кВт/год. Персонал налічує до 6 чоловік. В повітря викидається

Об'єм приміщення, який припадає на одного працюючого:

$$V' = \frac{V_r}{N} = \frac{15 \cdot 30 \cdot 6}{6} = 450 \text{ м}^3/\text{люд.}$$

Продуктивність вентилятора:

$$L = k \cdot V = 1,5 \cdot 2700 = 4050 \text{ м}^3/\text{год},$$

де k – кратність вентиляції для виробничих приміщень (беремо з довідкових даних, 1/год;

V – об'єм приміщення, м^3 .

Площа поперечного перерізу повітропроводу:

$$f_p = \frac{L}{3600 \cdot v_p} = \frac{4050}{3600 \cdot 9} = 0,125 \text{ м}^2,$$

де $v_p = 9 \text{ м/с}$ – прийнята швидкість повітря в повітропроводі.

Діаметр повітропроводу:

$$d_p = \sqrt{\frac{4 \cdot f_p}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,125}{3,1415}} = 0,398 \text{ м.}$$

Приймаємо стандартний діаметр повітропроводу: $d = 0,5 \text{ м}$.

Втрати тиску на тертя для кожної ділянки:

$$P_{mp} = R \cdot l = 0,154 \cdot 30 = 4,62 \text{ Па},$$

де R – питомі втрати тиску на 1 м довжини трубопроводів, Па/м [1];

l – довжина ділянки трубопроводу, м.

Втрати тиску в місцевих опорах:

$$z = \sum \xi \cdot \frac{v_f^2 \cdot \gamma}{2 \cdot g} = 1,2 \cdot \frac{9^2 \cdot 1,2}{2 \cdot 9,81} = 5,945 \text{ Па},$$

де ξ – коефіцієнт місцевих опорів, які приймають згідно таблиць [2];

γ – питома вага, Н/м^3 ;

v_f – фактична швидкість повітря, м/с.

Загальні витрати тиску на кожній розрахунковій ділянці:

$$H = R \cdot l + z = 0,154 \cdot 30 + 5,945 = 10,565 \text{ Па.}$$

Необхідна потужність електродвигуна вентилятора:

$$N_v = \frac{L \cdot H \cdot K}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta} = \frac{4050 \cdot 10,565 \cdot 1,2}{3600 \cdot 1000 \cdot 0,5} = 0,0285 \text{ кВт,}$$

де η – ККД вентилятора, $\eta = 0,5 \div 0,8$;

K – коефіцієнт запасу, $K = 1,1 \div 1,5$.

Обираємо стандартний електродвигун потужністю 0,18 кВт.

3.8.2 Небезпека ураження електричним струмом

Устаткування лінії, що розробляється, буде знаходитись в сухому приміщенні з нормальною температурою і вологістю повітря. Підлога приміщення залізобетонна. Згідно ПУЕ воно відноситься до приміщень з підвищеною безпекою .

Для живлення елементів установки використовується трифазна напруга 220/380 В з частотою 50 Гц з глухозаземленою нейтраллю.

Причини ураження обслуговуючого персоналу електричним струмом можуть бути такими:

- помилкове включення установки;
- замикання на корпусі;
- випадки дотику людей до відкритих струмопровідних частин електроустаткування;
- старіння ізоляції і, як наслідок, втрата ізоляційних властивостей;
- дотик до частин установки, що можуть опинитися під напругою у випадку короткого замикання.

Для забезпечення електробезпеки передбачені організаційні і технічні заходи:

- Інструктаж і навчання безпечним методам праці.
- Установлення плакатів і знаків безпеки (на небезпечних місцях - джерелах живлення, на регуляторах, і т. ін.)
- Вирівнювання потенціалу.
- Ізоляція струмоведучих частин. Контроль ізоляції здійснюється прибором ПНКИ. $R_{i3}=0,5\text{МОм}$.
- Установлення попереджувальної сигналізації, блокувань.
- Використання електрозахистних засобів, у т.ч. діелектричних рукавичок, інструментів з ізолюючими ручками, показчиків напруги.
- Захисне занулення.
- Захисне відключення.

Так як маємо установку з глухозаземленою нейтраллю, то використовуємо захисне занулення (рисунок 3.12).

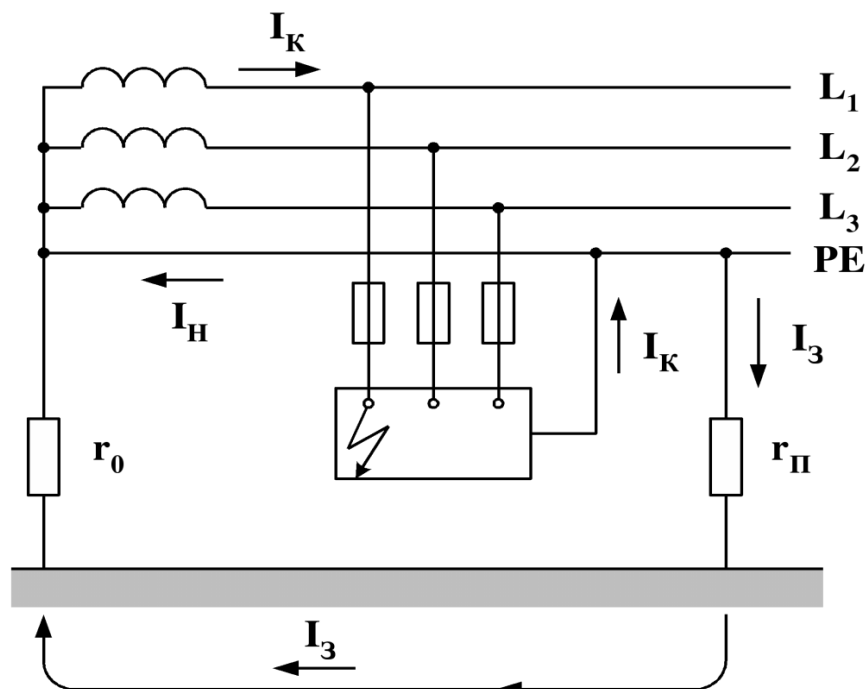


Рисунок 3.12 – Захисне занулення

Занулення виконують електричним з'єднанням металічних частин електроустановок з заземленою точкою джерела струму за допомогою нульового захисного провідника.

В аварійному режимі

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{U_{\phi}}{z + r_0} = \frac{220}{0,2 + 0,4} = 366,67 \text{ A} > 300 \text{ A}.$$

Параметри відповідають ГОСТ 12.1.030-87

3.8.3 Небезпека впливу елементів устаткування, нагрітого до високих температур

Причинами травм може бути дотик людей до нагрітих поверхонь. Щоб уникнути травм, ці поверхні покриваються шаром ізоляції з мінеральної вати марка 300 ГОСТ 4640-76.

Небезпечними елементами в установці є:

- поверхні черв'ячного преса, фільтра і головки;
- поверхні двигунів.

Зовнішня температура ізоляції не перевищує 45 °С що відповідає СН 245-71. Температура поверхні теплоізоляції контролюється термометром за ГОСТ 2823-73.

3.8.4 Виробничий шум та вібрації

Джерела виробничого шуму та вібрації:

- привід екструдера;
- механічна передача;
- вентилятори;
- черв'яки.

Шум може тимчасово активізувати або постійно пригнічувати психічні процеси організму людини. Фізіологічні та біологічні наслідки можуть з'являтися у формі порушення функцій слуху та інших аналізаторів, зокрема вестибулярного апарату, координуючої функції кори головного мозку, нервової системи, систем травлення і кровообігу.

Встановлено, що втрата слуху настає при впливі шуму в діапазоні частот 3000 – 6000 Гц, а порушення розбірливості мови - при частотах 1000 – 2000 Гц. Максимальна вірогідність втрати слуху протягом перших десяти років роботи і з плином часу ця небезпека зростає.

Несподівані та імпульсні шуми можуть викликати переляк та неадекватну поведінку. Постійний шум може негативно впливати на сенсорні функції знижуючи, наприклад, швидкість руху очей, звуження поля зору, викликаючи зміну кольорового сприйняття, порушення рівноваги, втрату больової чутливості.

Індивідуальні особливості людини, пов'язані з різними психологічними реакціями на вплив шуму суттєво впливають на його сприйняття. Шум не лише погіршує самопочуття людини і знижує продуктивність праці на 10- 15%, але нерідко призводить до професійних захворювань. Матеріальні збитки від цих захворювань значно більші, ніж від інших професійних захворювань. У зв'язку з цим боротьба з шумом має не лише санітарно - гігієнічне, але й велике техніко - економічне значення. Тому необхідно розробити комплекс інженерно - технічних та організаційних заходів щодо зниження шуму до нормативних значень.

Рівень звукового тиску (дБ) в октавних смугах частот, рівні звуку і еквівалентні рівні звуку (дБА) для постійних робочих місць при працюючій установці, встановлені за ДСН 3.3.6.037-99. В джерелі утворення шуму звуковий тиск перевищує гранично допустимий 66 – 67 дБА, тому для захисту персоналу від підвищених шумів при роботі обладнання застосовуються навушники.

Згідно ДСН 3.3.6.037–99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» еквівалентний рівень шуму не повинен перевищувати 66 дБА.

Як індивідуальні засоби для захисту від шуму прийнято протишумові навушники ПШН-Б (ГОСТ 12.4.051.87), виробництва КП «Київський виробничий комбінат ТСО України». Призначені для захисту органів слуху від дії середньо- та високочастотного шуму з рівнем до 115 дБА.

Так як шумові характеристики електродвигунів згідно ГОСТ 16372-84 перевищують передбачені ДСН норми допустимих рівнів звукового тиску рівня звуку і еквівалентних рівнів звуку на робочих місцях, то в цьому випадку необхідно вжити заходів щодо зниження шуму до нормативних значень.

Лінія для виробництва гранул поліетилен-каучукової композиції знаходиться в приміщенні довжиною 30 м, шириною 15 м, висотою 6 м і об'ємом 2700 м³.

Рівень звукової потужності виробничої лінії (джерело шуму) наведено в таблиці 3.5. Загальна площа огорожувальних поверхонь = 1260 м.

Необхідно визначати величину додаткового звукопоглинання ΔA_n для розрахункової точки, розташованої на віддалі 6 м від джерела шуму і вибрати конструкцію звукопоглинача.

Таблиця 3.5 – Акустична потужність джерела шуму

Середньо-геометрична частота Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Рівень звукової потужності дБ	93	95	98	95	96	97	98	93

Для об'єму $V=2700\text{м}^3$ знаходимо постійну приміщення (категорія б, таблиця 3.6).

Визначаємо величину граничного радіусу за формулою:

$$r = 0.2\sqrt{B_{8000}} \text{ м}$$

Таблиця 3.6 – Вибір індексу прямої

Опис приміщення	Індекс прямої
Без меблів, з невеликою кількістю людей (металообробні цехи, вентиляційні камери, генераторні, машинні зали, випробувальні стенди і т.п.).	а
З жорсткими меблями або з невеликою кількістю людей і м'якими меблями (лабораторії, ткацькі та деревообробні цехи, кабінети і т. п.).	б

Визначаємо B_{1000} за графіком; $B_{1000}=100 \text{ м}^2$,

$$B_{8000}=\mu B_{1000}$$

де μ – частотний множник, який знаходиться по таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Частотний множник μ

Об'єм приміщення, м^3	Середньо геометрична частота, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
2700	0,8	0,75	0,7	0,8	1	1,4	1,8	2,5
	0,65	0,62	0,64	0,75	1	1,5	2,4	4,2
	0,5	0,5	0,55	0,7	1	1,6	3	6

Тоді $B_{8000}=\mu B_{1000}=100 \cdot 6=600 \text{ м}^2$.

При таких вихідних даних:

$$r = 0,2\sqrt{B_{8000}} = 0,2\sqrt{600} = 4,9 \text{ м.}$$

Величина очікуваного рівня звукового тиску визначається за формулою:

$$L = L_p + 10 \lg \left(\frac{a}{S} + \frac{4}{B_{iu}} \right),$$

де L_p – октавний рівень звукової потужності шуму, дБ;

S – площа уявної поверхні правильної геометричної форми, що оточує джерело і проходить через розрахункову точку, м².

Тоді необхідне зниження рівнів звукового тиску в розрахунковій точці від одного джерела шуму визначається як різниця очікуваного рівня звукового тиску в розрахунковій точці до реалізації заходів щодо зниження шуму L та допустимого рівня $L_{\text{доп}}$:

$$\Delta L_n = L - L_{\text{доп}} \text{ дБ} \lim_{x \rightarrow \infty}$$

При визначенні ΔL_n як $L_{\text{доп}}$ приймаємо криву граничного спектра ГС-75. Розрахунок наведено в таблиці 3.5.

В зоні відбитого звуку ΔL_n такі, що звукопоглинальне облицювання може забезпечити необхідне зниження рівня звукового тиску. За графіками знаходимо величину ΔA_n додаткового звукопоглинання. Значення ΔA_n знаходимо для октавних смуг, в яких має місце максимум частотної характеристики $f = 1000$ та 2000 Гц.

Таблиця 3.8 – Розрахунок необхідного зниження шуму

Величина, що визначається	Одиниці вимірювання	Середньо геометрична частота октавної смуги, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L_p	дБ	93	95	98	95	96	97	98	93
B_{1000}	м	-	-	-	-	100	-	-	-
μ	-	0,5	0,5	0,55	0,7	1	1,6	3	6
$B = \mu B_{1000}$	м	50	50	55	70	100	160	300	600

Продовження таблиці 3.8 – Розрахунок необхідного зниження шуму

Величина, що визначається	Одиниці вимірювання	Середньо геометрична частота октавної смуги, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$a'/2\pi r^2$ ($a'=1, r=6$ м)	-	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
$4/B$	м ²	0,08	0,08	0,073	0,058	0,04	0,025	0,013	0,006
$\Sigma=4/B + a'/2\pi r^2$	м ²	$8,4 \cdot 10^{-2}$	$8,4 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
$10/\lg \Sigma(4/B + a'/2\pi r^2)$	-	-11,8	-11,8	-11,1	-12,1	-13,6	-15,4	-17,7	-20
$L = L_p + 10/\lg \Sigma^*$ ($4/B + a'/2\pi r^2$)	дБ	81	83	87	83	82	81	80	73
$L = L_p + 10/\lg \Sigma^*$ ($4/B + a'/2\pi r^2$)	дБ	81	83	87	83	82	81	80	73
$L_{\text{доп}}(\text{ГС-75})$	дБ	93	86	81	78	75	73	71	70
$\Delta L_n = L - L_{\text{доп}}$	дБ	-12	-3	6	5	7	8	9	3

Вибираємо плити “Вініпор” напівжорсткі товщиною 50 мм з повітряним прошарком 150 мм.

Визначається необхідна площа облицювання. Результати розрахунку наведено в таблиці 3.6. Загальна площа облицювання складає 560 м² (стеля – 300 м² і стіни - 260 м²). Це відповідає необхідній величині площі облицювання.

Використання для акустичної обробки цеху звукопоглинальних плит забезпечує зниження рівнів відбитого звуку, а рівні звукового тиску в контрольній точці не перевищують допустимих величин, тобто 66 дБА, тому величина загальної технологічної вібрації на постійних робочих місцях при працюючій установці у виробничих приміщеннях не перевищує норм, встановлених за ДСН 3.3.6.039-99.

Таблиця 3.9 – Розрахунок додаткового звукопоглинання

Величина, що визначається	Одиниці вимірювання	Середньгеометрична частота октавної смуги, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
B	m^2	50	50	55	70	100	160	300	600
$B+S$	m^2	1310	1310	1315	1330	1360	1420	1560	1860
$a=B/(B+S)$	-	0,04	0,04	0,04	0,05	0,07	0,11	0,19	0,32
k	-	-	-	0,13	0,1	0,22	0,48	0,41	0,2
ΔA_H	m^2	-	-	175	150	300	550	500	250
$a_{ліч}$	-	-	-	0,83	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$S_{ліч}=\Delta A_H/a_{ліч}$	m^2	-	-	210	150	300	550	500	250

3.8.5 Пожежна безпека та надзвичайні ситуації

У процесі роботи екструзійного обладнання використовуються вибухонебезпечні речовини. Виходячи з цього технологічний процес виробництва гранул поліетилен-каучукової композиції відноситься до категорії В (ОНТП-24-86).

Стійкість споруди за ПУЕ відповідає ступеню вогнестійкості II. Згідно ПУЕ клас зони установки П-Іа.

Серед причин, що можуть викликати загорання, найбільш імовірними є такі:

- несправність електроустаткування;
- струми короткого замикання і навантаження кабелів живлення;
- загорання ізоляції електропроводки;
- використання вогню в неналежному місці.

Засоби запобігання виникненню пожежі:

- дотримання технологічних норм і правил експлуатації;
- обмеження в застосуванні відкритого вогню;
- паління тільки у відведених для цього місцях;
- своєчасне проведення інструктажу з техніки безпеки серед обслуговуючого персоналу;
- наявність засобів сигналізації, зокрема, системи електричної пожежної сигналізації (ЕПС) і засобів оперативного зв'язку з пожежною частиною;
- наявність засобів пожежогасіння в безпосередній близькості від установки (пісок, вогнегасники).

Для гасіння невеликих ділянок загорання та тушіння пожеж класу А (горіння твердих речовин), класу В (горіння рідких речовин), класу С (горіння газоподібних речовин) при виключеному та включеному (до 1000 В) електроустаткуванні застосовують порошкові закачні переносні вогнегасники ОП-5(з) (6 шт.) та установки пожежогасіння порошкові закачні типу «САМ-9» (15 шт.).

Вогнегасники розміщуються в зоні видимості персоналу, поряд з обладнанням. Обов'язковим є проведення інструктажу з використанням засобів пожежогасіння.

Для захисту органів дихання застосовують повітряний апарат МПА-4х20.

В приміщенні, де розташовується установка, на відстані 30 метрів одне від одного встановлено пожежні гідранти з рукавами довжиною до 10 метрів. Відстань до пожежного виходу не більше 40 метрів.

Кількість виходів - не менше двох. Ширина дверей евакуиходу - 2 метри. Двері евакуиходу повинні відкриватись на зовні. Обладнання розташовується на відстані приблизно 1-2 м до стін будівлі, для вільного огляду персоналу. Засоби пожежогасіння рівномірно розташовано в приміщенні, для швидкого орієнтування при виникненні пожежі в приміщенні.

Приміщення обладнано аварійною вентиляцією, датчики розраховано на спрацювання при 20 % в нижньої концентраційної межі вибуху.

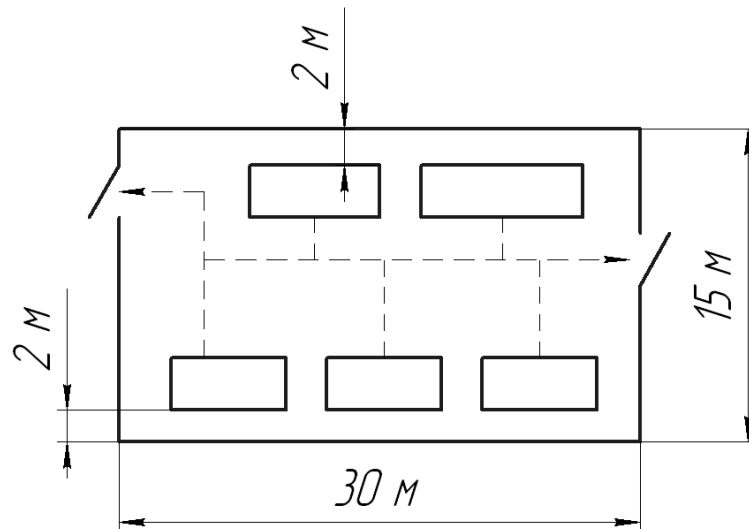


Рисунок 3.13 – План евакуації

Відповідність екструзійного обладнання до вимог охорони праці:

1. Робота екструдера допускається при ввімкненій вентиляції і пристроїв для видалення і нейтралізації шкідливих речовин, що виділяються при переробці вихідної сировини.
2. Перед початком роботи екструдера необхідно перевірити наявність усіх заземлень.
3. Шафа керування приводом закрыта.

4. Температура нагрівання зовнішніх поверхонь корпусу, доступних дотику з людиною не більше 45 °С.
5. Підходи до електроприводів, пульта і шаф вільні.
6. Робота в спецодязі.
7. На випадок можливого самозаймання передбачені засоби гасіння.
8. Рівень шуму, вимірюваний при роботі машини, не перевищує 66-67 ДБА на частоті 1000 Гц.
9. Доторкатися до розплаву полімеру можливо тільки у рукавицях типу АТВ ДСТ 12.4.010-75
10. Під час роботи лінії категорично заборонено:
 - проводити ремонтні роботи;
 - опускати руки в бункер-дозатор;
 - знімати огороження з обертових частин.

Виробнича будівля та устаткування, технологічні процеси відповідають вимогам, що забезпечують безпечні умови праці, відповідно до закону про охорону праці і національної програми по охороні праці.

3.9 Висновки

За результатами експериментальних досліджень:

1. Визначено реологічні параметри розплаву поліетилен-каучукової композиції, а саме коефіцієнт консистентності $K = 472 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ та показник степеню консистентності $n = 0,728$.
2. Визначено що розплав відноситься до неньютонівських рідин, характер зміни в'язкості розплаву від напруження зсуву нелінійно змінюється;
3. Отримані реологічні параметри використано для розв'язання математичної моделі течії розплаву у робочих зазорах змішувального елемента.

4. Отримано залежність об'ємної витрати від тиску, що діє на розплав при температурах 165 °C та 180 °C та встановлено зростання текучості розплаву при зростанні тиску, що діє на розплав та збільшенні температури розплаву.

5. 2. Отримано регресивну залежність об'ємних втрат розплаву через капіляр від тиску з вірогідністю 0,96.

6. В ході віртуального експерименту отримано епюри швидкості, швидкості зсуву. Отримані значення порівняно з значеннями розв'язку математичної моделі течії розплаву у робочих зазорах змішувального елементу.

7. Сформульовано вимоги до охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, при проведенні дослідів та при виробництві гранул полімер-каучукових композицій.

4. ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Рекомендації щодо проектування конструкцій змішувальних елементів

Аналізуючи математичну модель процесу було проведено чисельний експеримент для визначення основних змінних геометричних параметрів змішувального елемента на ефективність проведення процесу змішування полімер-каучукових сумішей.

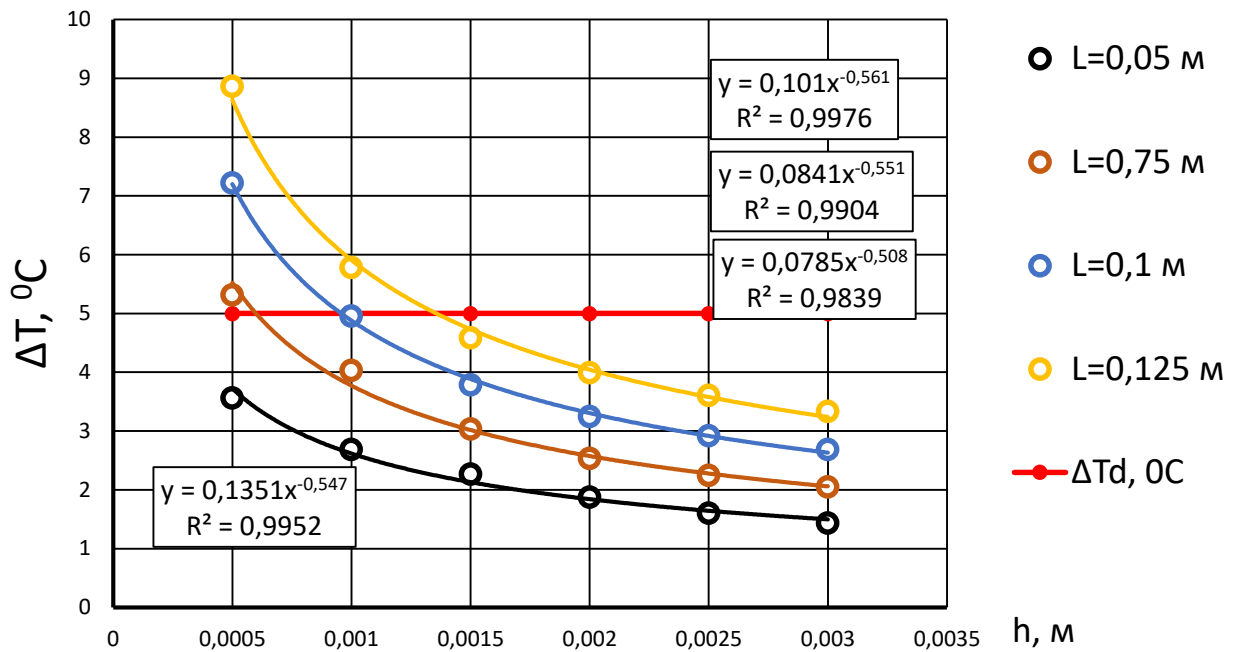
В ході проведення чисельного експерименту було отримано залежності перегріву розплаву від дисипативних тепловиділень та перепаду тиску при течії в робочих каналах та зазорах від геометричних розмірів змішувального елемента. Основними геометричними розмірами змішувального елемента є глибина робочого зазору між циліндром корпусу та змішувальним елементом та довжина зазору.

Вхідні дані до чисельного експерименту: матеріал поліетилен високої густини марки BASELL/LUPOLEN 4261A, діаметр шнеку $D = 63$ мм; частота обертання $n = 80$ об/хв; масова продуктивність $G = 120$ кг/год; ширина зазору $B = 5$ мм.

Досліджувався вплив основних геометричних параметрів змішувального елемента на ефективність проведення процесу змішування неоднорідних сумішей поліетилену з наповнювачами. Глибина робочих зазорів змінювалась в межах від 0,5 мм до 3 мм, довжини робочих зазорів 50; 75; 100; 125 мм.

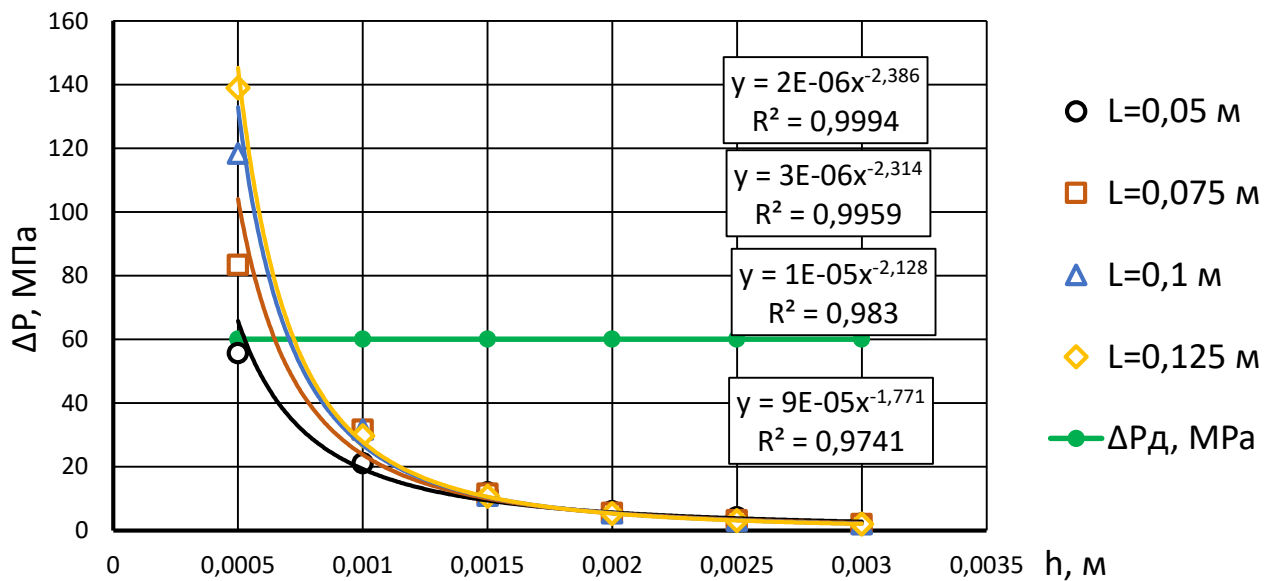
Реологічні параметри розплаву поліетилену високої густини марки BASELL/LUPOLEN4261A:

Коефіцієнт консистентності $K = 25124,8$ Па·с^{*n*} ; показник степеню консистентності $n = 0,4$. теплоємність розплаву $C_p = 2720$ Дж/(кг·°C); густина розплаву $\rho_0 = 860$ кг/м³; температура перед входом $T_0 = 200$ °C.



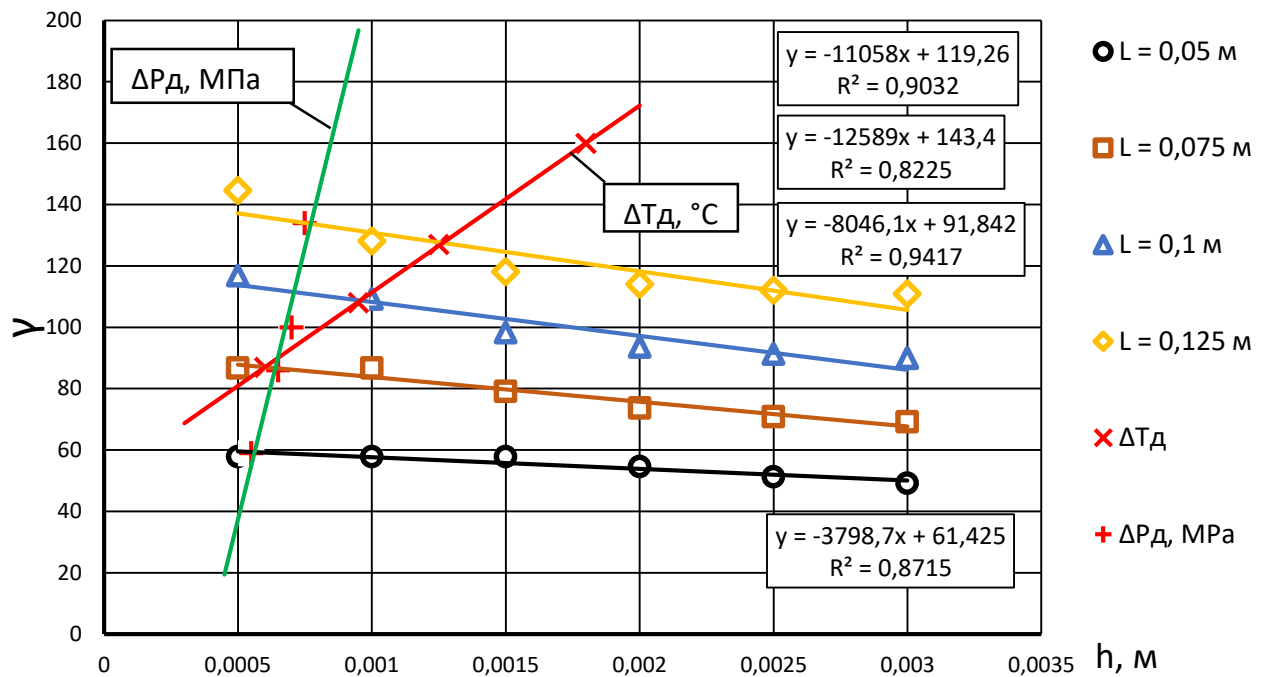
ΔT_d – допустима температура перегріву розплаву, °C; L – довжина робочого зазору м; h – глибина робочого зазору, м

Рисунок 4.1 – Залежність теплоти дисипації від геометричних розмірів змішувального елементу



ΔP_d – допустимий тиск, МПа; L – довжина робочого зазору м; h – глибина робочого зазору, м

Рисунок 4.2 – Залежність перепаду тиску від геометричних розмірів змішувального елементу



ΔT_d – допустима температура перегріву розплаву, $^{\circ}\text{C}$; ΔP_d – допустимий тиск, МПа; L – довжина робочого зазору м; h – глибина робочого зазору, м

Рисунок 4.3 – Залежність накопиченої деформації зсуву від геометричних розмірів змішувального елемента

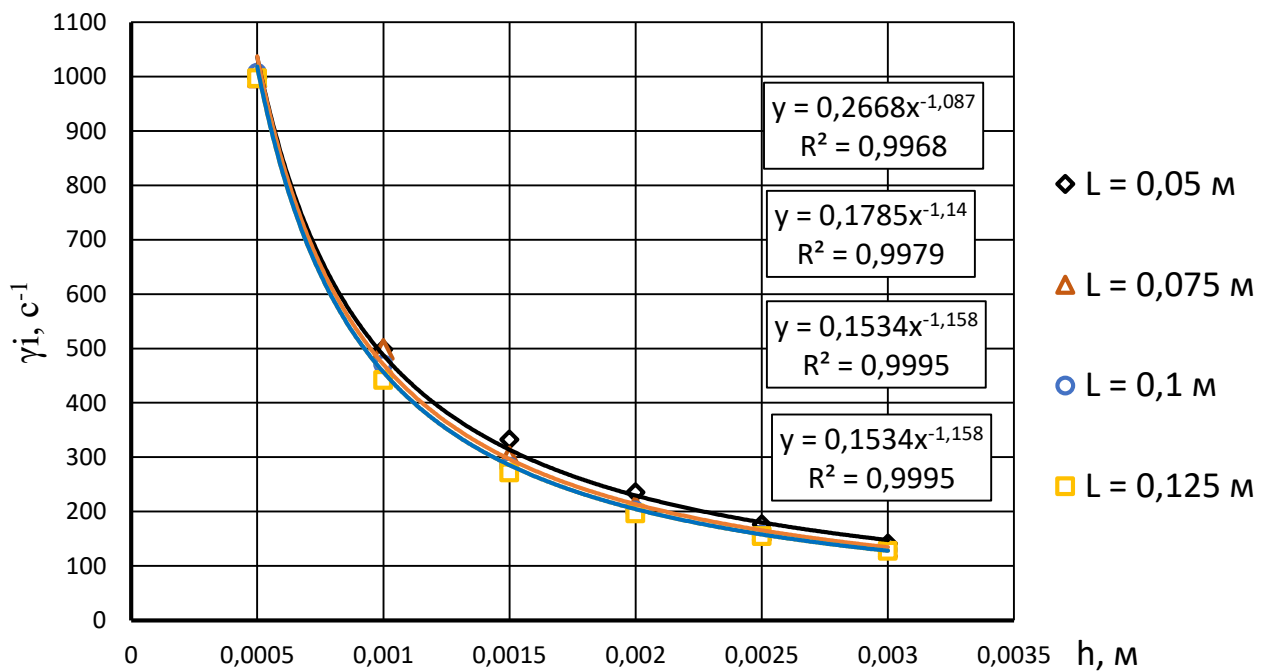


Рисунок 4.4 – Залежність швидкості зсуву від геометричних розмірів змішувального елемента

Ефективність роботи змішувального елемента Меддока напряду залежить від напірної характеристики екструдера та швидкості обертання черв'яка, однак має межу, обумовлену перегрівом розплаву та початком механодеструкції $\dot{\gamma} \geq 2000 \text{ с}^{-1}$ (температура композиції на вході в зазор 200°C , після зазору 270°C). Якість змішування та диспергування в основному залежить від геометричних розмірів змішувального елемента, а саме глибини та довжини робочих зазорів. Під час чисельного розрахунку в програмі Mathcad отримали наступні дані: перегрів розплаву у зазорах змішувального елемента $87,346^{\circ}\text{C}$; величина накопиченої деформації зсуву $\gamma = 133,291$; час перебування розплаву у робочому зазорі $t = 0,871 \text{ с}$.

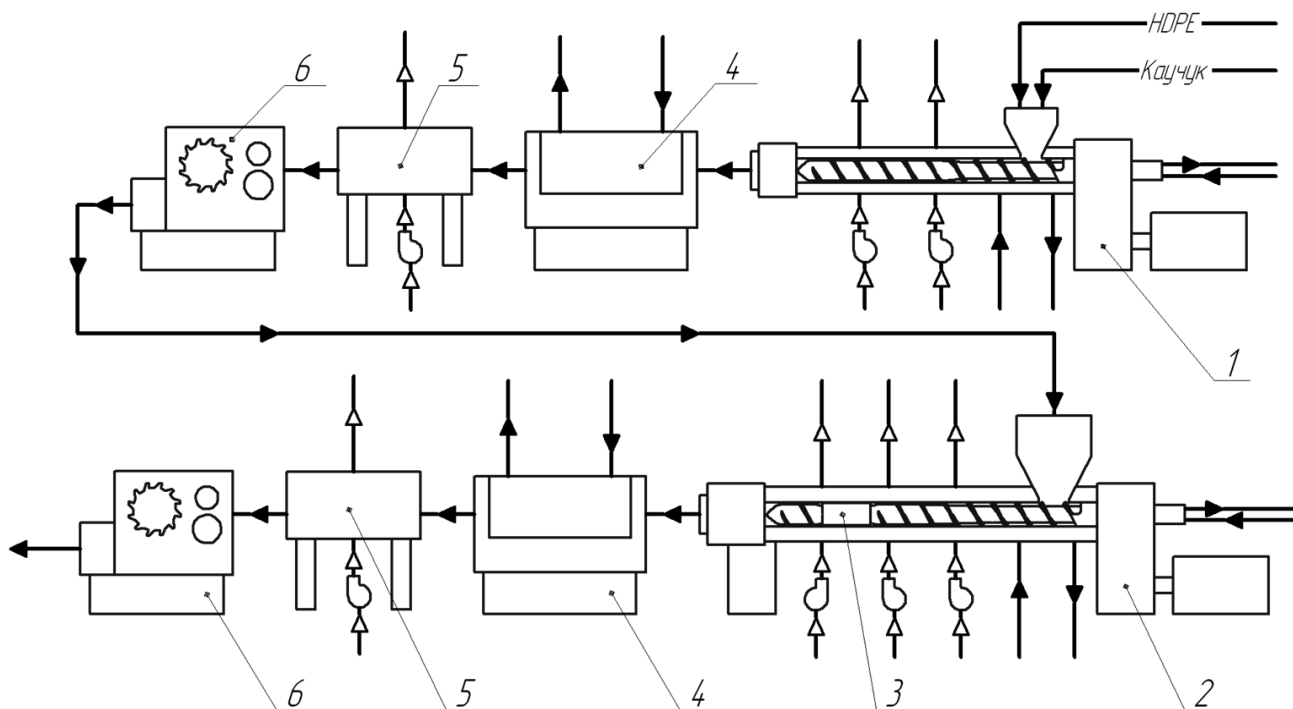
4.2 Опис технологічного процесу

Технологічний процес виробництва гранул полімер-каучукових композицій представлено на рисунку 4.5.

Гранули поліетилену, синтетичного каучуку, барвників та інших наповнювачів подаються за допомогою дозаторів та завантажувачів до екструдера 1 для попередньої екструзії та формуванню об'єднаної грубо змішуваної системи неоднорідної суміші. Після того як розплав проходить через формувальний інструмент екструдера 1, сформована стрічка розплав надходить до ванни охолодження 4 або гранулятора 6.

Отримані гранули системи подаються до одночервячного екструдера з змішувальним елементом 2. Одночерв'ячні екструдери 1 та 2 для контролю над температурами розплаву в кожній зоні, екструдери обладнано електронагрівачами, вентиляторами та водяним охолодженням.

Для попередження передчасного розплавлення полімеру у завантажувальній зоні екструдера встановлено внутрішнє охолодження корпусу екструдера водою.



1 – екструдер для попереднього змішування компонентів; 2 – екструдер для остаточного змішування компонентів; 3 – змішувальний елемент; 4 – ванна охолодження; 5 – сушарка; 6 – гранулятор

Рисунок 4.5 – Технологічний процес виготовлення гранул поліетилен-каучукової композиції

В зоні дозування (гомогенізації) одночерв'ячні екструдери обладнано електронагрівачами та вентиляторами. Електронагрівачі індукційні розміщено на корпусі екструдеру. Вони забезпечують швидкий нагрів корпусу, та швидкий контроль над температурою розплаву. Вентилятори застосовуються при необхідності охолодження розплаву.

Також одночерв'ячний екструдер зі змішувальним елементом Меддока додатково обладнано внутрішнім охолодженням черв'яка в зоні змішувальної секції 3, для попередження термічної деструкції полімеру від дисипативних тепловиділень.

Принцип роботи екструдерів полягає в проштовхуванні гвинтовою нарізкою гранул. Оскільки при переробці можливим є виробництво бракованого розплаву внаслідок термічної та механічної деструкції полімеру.

Далі розплав, що перемішується в змішувальному елементі 3 одночервячного екструдеру 2 видавлюється через формуючий інструмент, подається в ванну охолодження, де відбувається кристалізація розплаву. Потім сформована стрічка кристалізованого полімеру подрібнюється на грануляторі 6, та сушиться від вологи в сушарках 5.

Після цього отримані гранули упаковуються та переносяться на місце збереження.

4.3 Технічне рішення нової конструкції

За результатами досліджень запропонована нова конструкція та спосіб додаткового внутрішнього охолодження змішувального елементу та отримано патент на корисну модель [30], яка дозволяє запобігти термічній деструкції розплаву полімеру, що протікає через робочі зазори змішувального елементу.

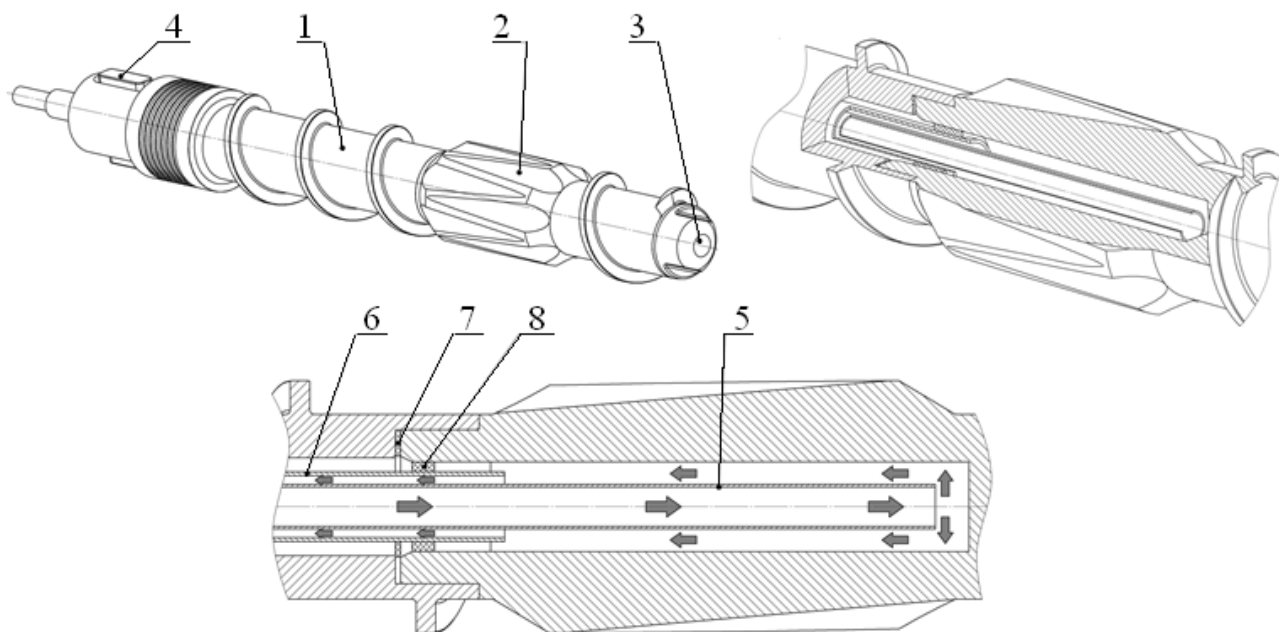
Конструкцію внутрішнього охолодження змішувального елементу наведено на рисунку 4.2.

Шнек екструдера для переробки полімерних матеріалів працює наступним чином [30]. До заготовки шнека 1 механічно прикріплена на різьбі деталь 2, яка містить елемент Меддока, до якої механічно, на різьбі прикріплено конус 3 з фасками під ключ для затягування різьб. Обидві різьби виконано з лівим напрямком для запобігання самотійного відкручування, а заготовка шнека містить наскрізний центральний отвір. Шпонки 4 встановлено для передачі крутного моменту обертання шнека. Охолоджуюча рідина через трубу меншого діаметру 5 потрапляє у порожнину деталі, на якій виконано елемент Меддока, та охолоджує її зсередини, після чого потрапляє у зазор між трубами 5 та трубою

більшого діаметру 6, і повертається назовні шнека. Прокладки 7 та 8 запобігають потраплянню охолоджуючої рідини, наприклад води у порожнину між трубою більшого діаметру 6 та поверхнею центрального отвору шнека.

За рахунок охолодження внутрішньої поверхні деталі у зоні розташування елемента Меддока охолоджується його зовнішня поверхня і досягається поставлена задача запобігти перегріву розплаву і його термічній деструкції.

Запропонована корисна модель нескладна у виготовленні та експлуатації, дозволяє інтенсифікувати диспергуюче змішування та отримати якісну гомогенізацію розплаву в'язких полімерних матеріалів та їх композицій.

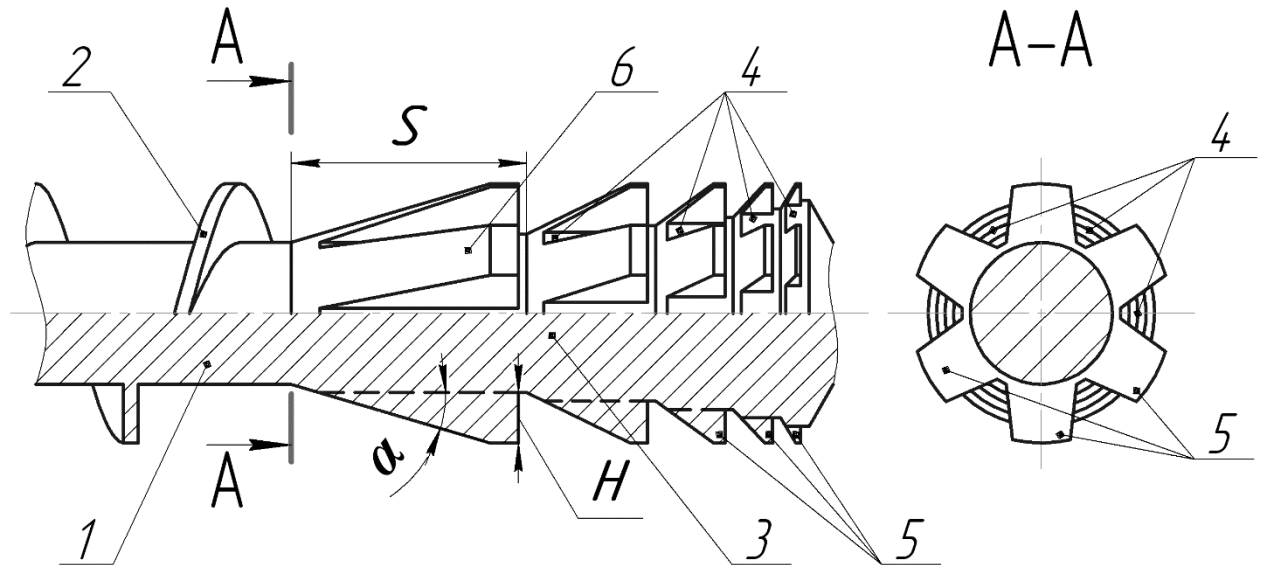


1 – гвинтова лінія; 2 – змішувальний елемент; 3 – конус для закріплення змішувального елемента; 4 – шпонка; 5 – внутрішня труба для підведення води; 6 – зовнішня труба для відведення води; 7, 8 – прокладки

Рисунок 4.2 – Модернізована конструкція внутрішнього охолодження змішувального елемента охолоджувальною водою

Також було запропоновано нову конструкцію змішувального елемента для забезпечення ефективнішого дистрибутивного змішування компонентів [31].

Конструкцію модернізованого змішувального елемента наведено на рисунку 4.3.



1 – черв'як; 2 – гвинтова лінія; 3 – змішувальна секція; 4 – повздовжні канали;
5 – виступи; 6 – сегментний ряд H – глибина повздовжніх пазів; S – довжина
сегментного ряду

Рисунок 4.3 – Модернізована конструкція змішувального елемента

Згідно результатів з використанням конструкції диспергувальних змішувальних елементів, дистрибутивне змішування може бути недостатнім. Саме тому запропоновано додатково обладнати черв'як, після змішувального елемента Меддока, конструкцією дистрибутивного змішувального елемента невеликої довжини.

Розплав полімеру рухається до змішувальної секції внаслідок дії надлишкового тиску який створюється при обертанні черв'яка. Після потрапляння розплаву полімеру до змішувальної секції відбувається стискування розплаву на конічній поверхні виступів 5 та потрапляння розплаву в робочі повздовжні пази 4. Внаслідок того, що черв'як 1 обертається, то при виході розплаву з повздовжнього робочого пазу 4 відбувається розрив високов'язкого потоку внаслідок високих швидкостей зсуву. Далі розплав потрапляє на

наступний сегментний ряд 6, де також відбувається попереднє стискання на конічній поверхні, потрапляння потоку розплаву в наступний робочий паз та подальший його розрив. Оскільки глибина кожного наступного робочого пазу 4 зменшується внаслідок чого повздовжні швидкості зсуву в кожній наступній ступені збільшуються, що інтенсифікує процес диспергуючого змішування полімерних композицій.

Застосування додаткового внутрішнього охолодження зони змішувального елементу дозволяє уникнути можливості термічної деструкції полімеру, встановлення на черв'яку після диспергувальної конструкції змішувального елементу, дистрибутивного змішувального елементу модернізованої конструкції забезпечити ефективніший процес змішування.

4.4 Висновки

1. Розроблено рекомендації щодо проектування конструкції змішувального елементу, в ході проведення чисельного експерименту математичної моделі течії розплаву у робочих зазорах змішувального елементу.

2. Якість змішування та диспергування в основному залежить від геометричних розмірів змішувального елементу, а саме глибини та довжини робочих зазорів.

3. Сформульовано технологічний процес виробництва гранул полімер-каучукових композицій.

4. Запропоновано модернізовану конструкцію внутрішнього охолодження внутрішнього охолодження зони змішувального елементу та конструкцію дистрибутивного змішувального елементу для підвищення ефективності дистрибутивного змішування компонентів неоднорідної суміші полімерів.

5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

5.1 Опис ідеї проекту

Переробка та створення нових композицій на основі полімерів є важливим напрямком розвитку промисловості України. Адже ці матеріали отримують кращі експлуатаційні та механічні характеристики в порівнянні з такими традиційними матеріалами як метали і їх сплави, звичайними однокомпонентними полімерами та деревиною.

Перевагами полімерних матеріалів в порівнянні з металами, деревиною та іншими матеріалами є висока міцність, пластичність, стійкість до корозії полімерів, а також ці матеріали є дешевшими в порівнянні з іншими матеріалами. Тому полімерні композиційні матеріали широко застосовуються для виробництва багатьох виробів та деталей.

Внаслідок того, що обсяг виробництва полімерних матеріалів в Україні є досить великим важливим питанням є збільшенні конкурентоспроможності виготовленої полімерної продукції з країнами Західної Європи та Азії.

Тому виробництво полімерних композиційних матеріалів та обладнання для їх переробки є актуальним і проблемним питанням, яке вимагає постійної уваги до себе.

Основними параметрами якості таких композицій, з гранул яких буде виготовлятися вироби, є рівномірний розподіл компонентів суміші в об'ємі матеріалу, тобто якість змішування при проведенні процесу екструзії полімер–каучукових композицій. Одночерв'ячні екструдери є найбільш широко застосовуваним обладнанням для переробки більшості полімерів та їх композицій, однак якість змішування в них може бути недостатньою. На якість змішування в одночерв'ячних екструдерах найбільше впливає, конструкція змішувального елемента.

Екструзія – процес отримання виробів шляхом проштовхування перероблюваного матеріалу, який знаходиться в в'язкотекучому стані через формувальний інструмент. У таблиці 5.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 5. 1 – Опис ідеї стартап–проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Нова конструкція змішувального елемента та пристрою для охолодження змішувального елемента в зоні гомогенізації одночерв'ячного екструдера	Виготовлення нових полімерних композицій з кращими експлуатаційними характеристиками	Підвищення продуктивності проведення процесу
		Перемішування неоднорідних сумішей з новим складом компонентів
		Вища якість продукції
	Застосування простішого одночерв'ячного екструзійного обладнання	Підвищення енергоефективності проведення процесу
		Зменшення витрат на придбання обладнання та його ремонту

Пропонується нова конструкція змішувального елемента та пристрою для охолодження змішувального елемента, що забезпечує інтенсивне диспергуюче змішування неоднорідних сумішей полімерів та охолодження змішувального елемента для запобігання термічної деструкції полімеру. Таким чином збільшення величини накопиченої деформації зсуву покращує якість змішування, а додаткове охолодження запобігає перегріву розплаву при його течії в робочих зазорах та каналах змішувального елемента.

Завдяки додатковому внутрішньому охолодженню змішувального елемента, шляхом подачі охолоджувальної рідини в циліндричний отвір всередині черв'яка одночерв'ячного екструдера в змішувальному елементі підвищується теплообмін, внаслідок охолодження безпосередньо змішувального

елементу, а не корпусу одночерв'ячного екструдера.

Проведено аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначено перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначено попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проведено збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- проведено порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні); в) кращі значення (S, сильні), наведено в таблиці 5.2 [19].

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
	Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
Вартість екструдера, грн	80000	100000	65000	120000	–	–	+
Витрата електроенергії, кВт/год	20	18,5	20	22	–	+	–
Продуктивність, кг/год	120	120	100	140	–	+	–
Вихід бракованої продукції, кг/год	2,4	6,8	10,5	4,5	–	–	+
Індекс змішування	0,97	0,95	0,9	0,97	–	–	+

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності. Основною конкурентною перевагою проекту є покращення змішування та зниження кількості випуску бракованої продукції через механічну та термічну деструкцію полімеру внаслідок дисипативних тепловиділень при його течії у змішувальному елементі, шляхом встановлення додаткового охолодження всередині змішувальної секції черв'яка.

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Полімерні матеріали, або пластмаси застосовуються в багатьох галузях народного господарства, як міцний, пластичний та відносно бюджетний матеріал.

Однак полімери в чистому вигляді нечасто застосовуються, внаслідок їх нижчих механічних характеристик в порівнянні з наповненими стабілізаторами, барвниками, наповнювачами та іншими компонентами, які поліпшують властивості звичайного однокомпонентного полімеру. Тому змішування полімерів в процесі їх переробки є вкрай актуальним.

Розроблення стартап-проекту проводимо згідно методики [19].

Конструкцію змішувального елемента наведено на рисунку. 5.1.

В межах даного підрозділу проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових:

1. За якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?

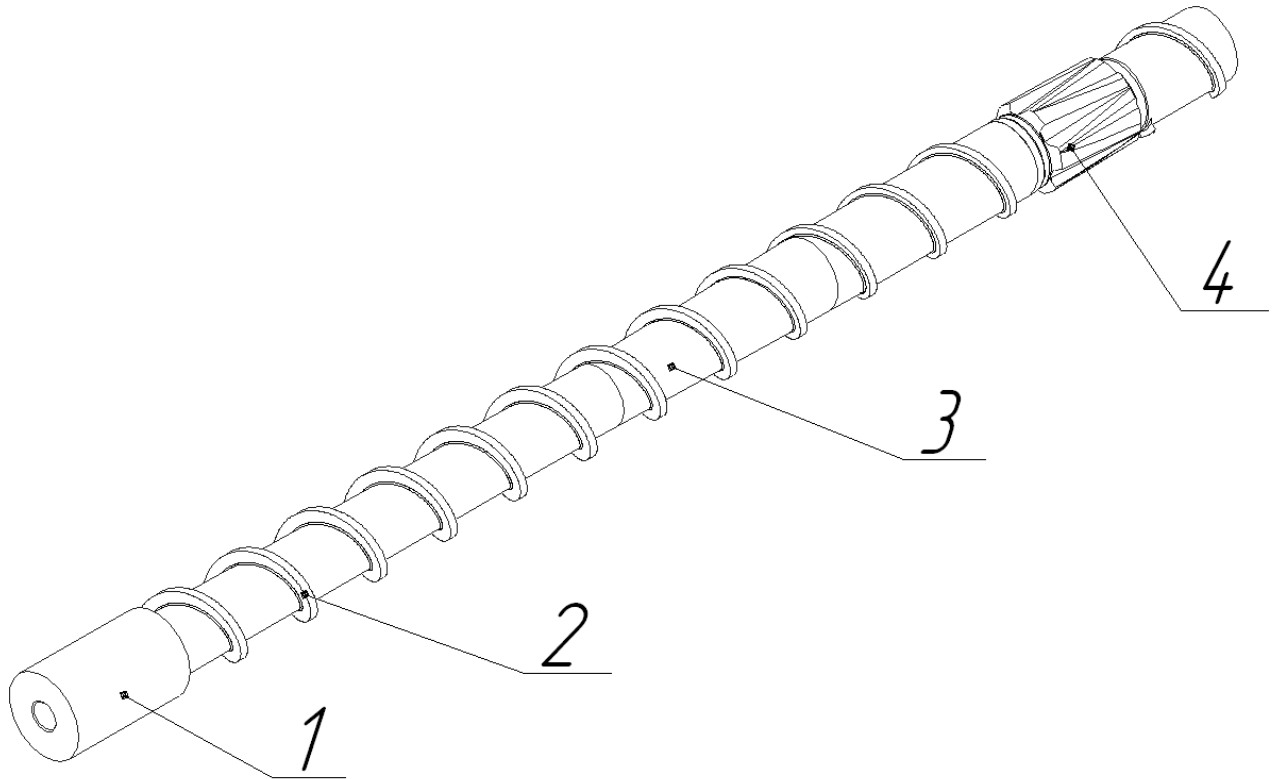
Змішувальні елементи виготовляються на спеціальному металорізальному обладнанні та верстатах з ЧПУ, внаслідок необхідності обробки складних поверхонь. Даний робочий елемент екструдера повинен витримувати значні навантаження та знос. Для цього їх азотують та піддають

гартуванню. Отримують із циліндричних сталевих заготовок круглого перетину.

2. Чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/доробити?
Дані технології існують. В розробці/доробці їх немає необхідності.

3. Чи доступні такі технології авторам проекту?

Так, дані технології доступні.



1 – хвостовик черв'яка; 2 – гвинтова лінія; 3 – канал черв'яка;
4 – змішувальна секція

Рисунок 5.1 – Конструкція черв'яка екструдера

За результатами аналізу видно, що можливості технологічної реалізації проекту, а також технологічного шляху, яким це доцільно зробити – є можливим.

Технологічна здійсненність ідеї проекту полягає в модернізації конструкції змішувального елемента для ефективнішого проведення процесу екструзії полімер-каучукових композицій.

В таблиці 5.3 наведено технологічна здійсненність ідеї проекту.

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Інтенсифікація процесу екструзії полімер каучукових сумішей	Модернізована конструкція змішувального елементу черв'яка одночервячного екструдера	На даний момент відомо багато конструкцій змішувальних елементів, однак процес змішування можна зробити ефективнішим.	Література для вивчення процесу екструзії представлена декількома авторами, для підвищення конкурентоспроможності потребує подальшого вивчення
2	Підвищення енергоефективності	Додаткова модернізована конструкція змішувального елементу, нова технологічна лінія виробництва гранул полімерних композицій	Наявні, відомі конструкції модернізуються	На ринку представлено декількома основними виробниками екструзійного обладнання
3	Оптимізація та автоматизація процесу виробництва	Модернізована система автоматизації	Наявні, проводиться модернізація	Є доступними для купівлі, впровадження в виробничий процес
<p>Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Нова конструкція змішувального елементу Меддока дистрибутивним змішувальним елементом, з додатковим охолодженням</p>				

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначено ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів–конкурентів.

Спочатку проведено аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 5.3).

Виробництво гумових і пластмасових виробів, іншої неметалевої мінеральної продукції в Україні станом на 2017 рік відбулося зростання на 3,3% (р/р), внаслідок збільшення попиту з боку суміжних галузей (машинобудування, будівництва (зростання у серпні (р/р) будівництва інженерних споруд – на 30,5%)) [20].

В Україні працюють наступні виробники полімерів: (ВАТ «Лінос» («ТНК-Україна»), ЗАТ «Карпатнафтохім», ВАТ «Хімпром» (Первомайськ), ВАТ «Дніпроазот» (Дніпродзержинськ), ВАТ «Концерн Стирол» (Горлівка). Крім того, є невеликі підприємства–виробники і заводи, які мають виробничі потужності, але через нестачу сировини не функціонують.

Переробкою полімерів в пластмасу в Україні займаються сотні компаній. Товарами-лідерами серед вироблюваних в Україні полімерів є поліпропілен (ВАТ «Лінос»), поліетилен (ЗАТ «Лукор»), полістирол (ВАТ «Концерн Стирол»), ТЗОВ СП "Вінісін", ЗАТ "Синтра", ТЗОВ "Енія", ПП "Завод Пінопласт", ТЗОВ "Валест", ТЗОВ "Сніжка" та багато інших підприємств [21].

Виробниками продукції з полімерів є підприємства пластикові ящики та контейнери - «Полімерцентр», труби з полімерів ЗАТ «Рубіжанський трубний завод», ТД «Євротрубпласт», «Пластмодерн» тощо і багато інших підприємств, що виготовляють різноманітну продукцію від плівок та пакетів до пластикових

вікон (ПП «Технопласт», завод «Полімер – Електрон»). Найбільшими виробниками гумових виробів є підприємства ЗАТ «Росава» та ЗАТ «Дніпрошина» та інші .

В таблиці 5.3 наведено попередні характеристики потенційного ринку стартап-проекту.

Таблиця 5.3 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Кількість головних гравців, од	5
Загальний обсяг продаж, грн/ум. од	2000
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Масштабність
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ДСТУ, ГОСТ, ISO для продукції, а саме вимоги до токсичності тощо.
Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	78

За результатами аналізу таблиці можна зробити висновок, що ринок є привабливим для входження за попереднім оцінюванням. Однак проблеми виникають з забезпеченням власних полімерів, які є сировиною для подальшої переробки. Тому частина сировини імпортується в Україну.

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (таблиця 5.4).

Таблиця 5.4 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Потреба в полімерних композиційних матеріалах, потреба в підвищенні якості виробництва	Компанії по виготовленні будівельних матеріалів, упаковок, побутової техніки, труб, профілів тощо.	ДСТУ, ГОСТ, ISO	- до продукції: якісна структура полімеру та відповідність всім нормативам, щодо міцності, токсичності; - до компанії-постачальника: якість постачання, швидкість, доступність.

Проводимо аналіз ринкового середовища: складаємо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (таблиці 5.5, 5.6). Фактори в таблиці подавати в порядку зменшення значущості. Фактори поділяються на внутрішньо маркетингові середовище та зовнішньо маркетингові середовище [20–29]. До внутрішньо маркетингових факторів відносяться власний капітал стартап проекту, інтелектуальна ресурси, технологічні ресурси, матеріальні, місцезнаходження. До зовнішньо маркетингового середовища стартап проекту відносяться природні, політико–правові, соціо–культурні, економічні, науково–технічні і демографічного середовища. Фактори загроз вносимо до таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1. Політико-правові «Закон України про підприємницьку діяльність». «Закони України про ліцензування певних видів господарської	Може вплинути на працездатність проекту, купівлю/продаж товару, або ресурсу необхідного для товару Недостатня підтримка державою нових підприємців.	Відповідність вимогам законодавства України та країн з якими ведеться співпраця. Зміна напрямків імпорту/експорту

Продовження таблиці 5.5 – Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
діяльності».	Дорого вартісні ліцензії, заборона на діяльність без ліцензії.	
2. Військові дії на сході України. Торговельні відносини України з країнами ЄС, Китаю та інших країн.	Ембарго та заборони на торгівлю, митні збори при ввезенні імпортової продукції.	Перепрофілювання та пошук нових ринків збуту.
3. Природні: Пожежі, землетруси, повені, урагани	Руйнування інфраструктури.	Протидія стихійним явищам шляхом облаштування захистом від стихійних явищ, пожеж тощо, проведення інструктажу з техніки безпеки.
4. Економічні Криза Інфляція Підвищення цін на сировину.	Впливає на купівлю/продаж товару, або ресурсу необхідного для товару	Підвищення/пониження ціни на продукт
5. Науково-технічні застаріла конструкції екструзійного обладнання Невідповідність продукції наших споживачів та наших послуг науково-технічному розвитку галузі	Яким чином цей впливає на Ваш стартап? Не конкурентоспроможні полімерні композиційні матеріали з імпортними виробниками	Постійний пошук та моніторинг актуальних тенденцій в обраній та в суміжних сферах діяльності. Інноваційна діяльність.

Продовження таблиці 5.5 – Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
6. Демографічні: Зниження народжуваності та кількості населення.	Зниження кількості потенційних споживачів продукції, зниження попиту. Зменшення кількості кваліфікованих кадрів для роботи проекту.	Пошук нових клієнтів та проектування обладнання для виробництва дитячої продукції з полімерів та їх композицій. Наприклад, вихід на міжнародні ринки
7. Соціо-культурні: Консервативність поглядів споживачів	Небажання споживачів впроваджувати інноваційні рішення	Пояснення споживачам, що пропоновані послуги зможуть підвищити ефективність виробництва

Таблиця 5.6 – Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Науково-технічні	Поява нової технології змішування полімерних композицій.	Розробка нового обладнання та конструкцій змішувальних елементів. Впровадження даної технології та декларування власної ціни на дану пропозицію.
1. Демографічні: Зростання населення	Збільшення попиту на полімерні матеріали	Збільшення числа потенційних клієнтів в майбутньому.
2. Соціально-культурні: Консервативність поглядів споживачів	Небажання споживачів купувати нове обладнання	Пропонувати споживачам замість купівлі нового обладнання модернізацію їх виробництва за допомогою наших послуг

Надалі проводимо аналіз пропозиції: визначаються загальні риси

конкуренції на ринку, отримані дані заносимо до таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: олігополія	Невелика кількість конкуруючих фірм, при цьому хоча б одна або дві з них, виробляють значну долю продукції даної галузі	Пропозиція унікального продукту на ринку, який дозволить знизити високий бар'єр входу на ринок
2. За рівнем конкурентної боротьби: Національна конкуренція на ринку	Забезпечення конкурентоспроможності на світовому ринку	Пропозиція продукту з урахуванням вимог до наслідків його реалізації місцевих громад
3. За галузевою ознакою: Внутрішньогалузева конкуренція	Конкуренція за більш вигідні умови виробництва, за розширення ринків збуту своїх товарів, за одержання найбільшого прибутку між конкурентами в одній галузі	Підвищення ефективності всієї галузі, її технічний рівень та конкурентоспроможність, удосконалення структури виробництва відповідно до нових потреб.
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-родова	Зосередження конкурентоспроможності на якості товару	Постійний моніторинг ринку щодо появи продуктів(технологій) замінників
5. За характером конкурентних переваг: нецінова	Технічні переваги, впровадження нововведень, найефективніші методи збуту товару	Зосередження конкурентоспроможності на якості товару, наданні додаткових послуг та збільшення асортименту
6. За інтенсивністю: не марочна	Репутація проекту	Створення високого рівня ділової репутації, що сприятиме впізнаваності стартапу

Після аналізу конкуренції проводимо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за моделлю 5 сил М. Портера. Згідно цієї моделі розглядаємо 5 основних сил, які необхідно врахувати перед виходом на ринок, опис наведено в таблиці 5.8.

М. Портер вирізняє п'ять основних факторів, що впливають на привабливість вибору ринку з огляду на характер конкуренції.

- конкурент, що є вже в галузі;
- потенційні конкуренти;
- наявність товарів замінників;
- постачальники, що конкурують за ринкову владу;
- споживачі.

Таблиця 5.8 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Підприємства що займаються переробкою полімерів: ТОВ «Помімерцентр», «Електронполімер» тощо.	Конкурентом може стати підприємство яке почне співпрацювати з технічними вузами.	Напрямо по добутті сировини, (бажано купувати сировину в Українських виробників наприклад «Карпатнафтохім» та ін.)	- не конкурентоспроможне обладнання; - високі ціни на товари ; - не якісні послуги; - без інноваційне.	Інші матеріали (метал, деревина, кераміка та інші композиційні матеріали)

Продовження таблиці 5.8 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Висновки:	На даний момент більшість конкурентів не створює нових полімерних матеріалів та модернізації обладнання для їх перероби.	- Вхід на ринок можливий, внаслідок того, що промисловість потребує велику кількість конструктивних матеріалів, якими є полімери та їх композиції. - нових конкурентів не знайдено.	Час, ціна та якість сировини для переробки і поставки комплексуючих та його мінімальна вартість.	Клієнту завжди необхідно: Конкурентно спроможне обладнання за низькою ціною якісне та інноваційне	На даний момент полімери є найпоширенішими матеріалами тому замінники полімерів в більшості галузей промисловості відсутні.
-----------	--	--	--	---	---

Згідно отриманого аналізу конкуренції визначено, що конкуренція на ринку, що важливим конкурентним рішенням є розвиток технології змішування полімерних композицій, шляхом модернізації та створення нового обладнання для їх переробки.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в таблиці 5.8, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (таблиця 5.2), вимог споживачів до товару (табл. 5) та факторів маркетингового середовища (таблиці 5.5, 5.6) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності.

Згідно отриманих результатів основним параметром конкурентоспроможності є якість отриманих гранул поліетилен-каучукової композиції для виробництва виробів різного призначення, а саме завдяки антифрикційним особливостям отриманої композиції, для виробництва виробів та деталей, що труться. Аналіз факторів конкурентоспроможності наведено в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Експлуатаційні властивості полімерної композиції, якість змішування та однорідність структури	Якість змішування компонентів полімерних композиційних матеріалів формує якість виробів, які будуть виготовлятися, тому клієнти зацікавлені в отриманні якісного товару.
2.	Асортимент продукції конструкції змішувальних елементів черв'яків	Ми надаємо комплекс послуг по розробці виготовленню і монтажу а також постачаємо комплектуючі по низьким цінам.
3.	Сервісне обслуговування	Акцент на подальшій співпраці з існуючим клієнтами.
4.	Низька ціна	Зменшення вартості надання товарів та послуг шляхом зниження енергозатрат на виробництво полімерних композицій.

За визначеними факторами конкурентоспроможності проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту.

Таблиця 5.10 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні проектом*						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Низька ціна	5			◇	△	□		
2.	Якість	10		◇	□		△		
3.	Асортимент	5	△	□				◇	
4.	Рівень концентрації	0			△	□, ◇			

* □ – ЗАТ «Полімерцентр»

△ – ЗАТ «Рубіжанський трубний завод»

◇ – завод «Полімер – Електрон»

Складаємо SWOT-аналіз (матриці аналізу сильних (Strength), слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (таблиця 5.10), та вносимо результати до таблиці 5.11.

Таблиця 5.11 – SWOT - аналіз стартап -проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ul style="list-style-type: none"> 1. новизна проекту; 2. актуальність стартап-проекту полягає в збільшенні конкурентоспроможності споживачів підприємств полімерної промисловості; 3. низька вартість впровадження проекту; 4. інноваційна діяльність; 5. робота за вільним графіком працівників та креативність нашої роботи. 	<ul style="list-style-type: none"> 1. складність виходу на ринок; 2. низьке забезпечення сировиною в Україні для переробки з іншими компонентами композиції (поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид тощо); 3. складність знаходження інвестора, яка виконає модернізацію технологічної лінії отримання гранул композиції полімер-каучукових композицій; 4. низька дохідність проекту.
Можливості	Загрози
<ul style="list-style-type: none"> 1. створення нових рецептур полімерних композиційних матеріалів; 2. залучення до співпраці фахівців в інженерії; 3. модернізація та проектування нового обладнання для переробки полімерних матеріалів. 	<ul style="list-style-type: none"> 1. «Консервативність споживачів до запровадження інновацій». 2. Низька конкурентоспроможність на ринку. 3. Не відповідність проекту сучасним тенденціям в галузі.

Сильні сторони проекту: якість структури полімерної композиції; зменшення кількості виходу бракованого неякісного матеріалу; універсальність застосування модернізованого обладнання (швидке переорієнтування на нові види полімерних композиційних матеріалів).

Слабкі сторони проекту: невеликий асортимент продукції, що виготовляється; недостатня кількість сировинної бази в Україні та необхідність

купівлі імпортої полімерної сировини.

На основі SWOT-аналізу розробляємо альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Визначені альтернативи аналізуємо з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів, отримані дані вносимо до таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Використання полімерів для виробництва товарів для машинобудівної промисловості	На даний момент недостатньо висока, внаслідок малої кількості клієнтів	1,5 року
2.	Виробництво пластикових ящиків та іншої упаковочної продукції з полімерів в сільському господарстві	Достатньо висока	8 місяців
3.	Приладобудування та обслуговування техніки (полімерні композиції для даної галузі)	Достатня	1 рік

Після аналізу зазначити обираємо альтернативу виробництво нових композиційних матеріалів для сільськогосподарської промисловості.

На даний момент сільськогосподарська промисловість отримує найбільшу кількість інвестицій з закордону та України, тому розробка альтернативного проекту в даній галузі є актуальним. В сільському господарстві необхідна велика кількість тари та упаковок для перевезення, зберігання та заморозки сільськогосподарської продукції. Прикладом є пластикові ящики для заморозки, зберігання та перенесення продукції. Недоліком їх матеріалу є можливість розтріскування при охолодження, при падінні тощо. Запропонований варіант

змішування додаткових пластифікаторів з основним полімером здатне вирішити дану проблему. Після аналізу обираємо альтернативу диференціації, що передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (таблиця 5.13). Розроблення ринкової стратегії проекту проводимо згідно методикою наведеною в [19].

Таблиця 5.13 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Будівельні компанії, харчова та хімічна, сільськогосподарська, приладобудівна промисловості	Зазнаватиметься готовністю підприємств піти на додаткові витрати пов'язані з впровадженням імплементації результатів наукових досліджень в господарській діяльності	Залежить від рівня та темпу розвитку економіки країни, насамперед від галузей-споживачів, а також рівня характеру конкурентів з боку держави	Низька	Високі бар'єри входу на ринок
Обрано наступні цільові групи: підприємства сільськогосподарської, приладобудування та будівельна промисловості різних форм власності.					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) обираємо сільськогосподарської, приладобудування та будівельна промисловості і використовуємо стратегію концентрованого маркетингу.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку, яка наведена в таблиці 5.14.

Таблиця 5.14 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1.	Виробництво пластикових ящиків та іншої упаковочної продукції з полімерів в сільському господарстві	Концентрований маркетинг	Наслідування дій лідера, захисні дії	Диференціації
2.	Полімерні композиції для приладобудування	Диференційований маркетинг	Захисні дії, наслідування лідера	Лідерства по витратах

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки, таблиця 5.15.

Таблиця 5.15 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1.	Ні	Передбачається розвиток ринку	Ні, не буде. Буде утворено унікальну продукцію	Наслідування лідера

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (таблиця 5.14) та стратегії конкурентної поведінки

розробляється стратегія позиціонування (таблиця 5.15). що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 5.16 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1. до продукції: якість структури полімеру, склад та однорідність розподілення компонентів, наявність дефектів, міцність 2. до компанії-постачальника: якість постачання, швидкість, доступність	Інтегративного зростання (поєднання з інвесторами та клієнтами)	Буде утворено унікальну продукцію Нова конструкція змішувального елементу, інтенсифікація процесу екструзії та вища енергоефективність процесу виробництва гранул композиції.	Виробництво асортименту, для кожного клієнта У клієнтів має сформуватися асоціація, що ця технологія підвищуватиме ефективність їх виробництва і дозволить їм надалі економити

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у таблиці 20 підсумовуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.17 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Нові конструктивні матеріали.	Нові експлуатаційні властивості отриманих композицій	Якість структури полімеру, ціна, підтримання потрібних характеристик
2.	Зменшення виходу бракованого матеріалу	Збільшення продуктивності та підвищення якості продукту	Інноваційна конструкція та спосіб охолодження змішувального елементу черв'яка одночерв'ячного екструдера
3.	Зниження енергозатрат на виробництво (проведення процесу змішування полімерних композицій).	Зменшення ціни продукту	Інноваційна конструкція та спосіб охолодження змішувального елементу черв'яка одночерв'ячного екструдера

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (таблиця 5.18). Орієнтовний перелік можливих характеристик товару наведено у методиці [1].

До основних техніко-економічних характеристик товару відносяться:

- Економічні – вартість обслуговування, експлуатації, утилізації, витратних матеріалів, ремонту, знижки;

- Призначення (технічні) – показники, що визначають головний напрямок використання товару та можливу сферу його застосування: класифікаційні показники, складу і структури, технічної досконалості;
- Надійності – здатність товару безвідмовно функціонувати: безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність;
- Технологічні – можливість оптимізації витрат матеріалів, праці, коштів, часу під час технологічної підготовки виробництва, виготовлення та використання товару;
- Ергономічні – показники ступеню адаптованості технічних та конструктивних рішень виробу до біологічних властивостей людини та середовища використання товару: гігієнічні, антропометричні, фізіологічні та психологічні;
- Органолептичні – визначають властивості товару, які людина може визначити за допомогою своїх органів чуття;
- Естетичні – оцінюють зовнішній вигляд товару;
- Транспортабельності – визначають пристосованість продукції до транспортування, підготовчих, початкових і кінцевих операцій перевезення;
- Екологічності – характеризують рівень негативного впливу на довкілля;
- Безпеки – безпечності та нешкідливості споживання товару.

Формулюємо три рівні товару: товар за задумом, товар у реальному виконанні та товар із підкріпленням. Далі розглядаємо техніко-економічні характеристики кожного рівню товару, отримані дані вносимо до таблиці 5.18.

Товар за задумом – нова конструкція змішувального елементу одночервячного екструдера, що дозволяє інтенсифікувати процес змішування неоднорідних сумішей полімерів та зменшити вихід бракованого матеріалу.

Товар у реальному виконанні – поліпшена структура гранул полімерної композиції з каучуком.

Товар з підкріпленням – сервісне обслуговування та консультації.

Таблиця 5.18 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Опис базової потреби споживача, яку задовольняє товар (згідно концепції), її основної функціональної вигоди:		
	Конструкція змішувального елемнту з додатковим охолодженням для запобігання термічної деструкції.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Технічні: гранули композиції поліетилену та каучуку діаметром 2 – 8 мм в упаковці від виробника з перевіреними характеристиками; 3. Економічності: зниження затрат на ремонт, зменшення бракованих виробів та зменшення простоїв виробництва; 4. Ергономічність: доступ до всіх елементів конструкції; 5. Безпека: відповідність нормативам; 6. Екологічність: вміст шкідливих домішок нижче допустимих.	+/+	-/+ /+/-/-
	Якість: стандарти, нормативи, параметри тестування міжнародні та вітчизняні стандарти ДСТУ, ISO, DIN та інші.		
	Пакування– в поліетиленових мішках з логотипом підприємства.		
	Марка: назва організації-розробника + назва товару		
III. Товар із підкріпленням	До продажу : Роз’яснення клієнтові питань з технологією переробки		
	Після продажу: Гарантія якості продукції		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Використання власних запатентованих розробок та методів оптимізації, консультування та шляхів розв’язку проблеми.			

Полімерні композиційні матеріали є неоднорідними сумішами декількох нерозчинних один в одному компонентів, тому важливими техніко-

економічними параметрами є характеристики призначення (технічні), для забезпечення заданих експлуатаційних властивостей матеріалу. Полімерний композиційний матеріал повинен бути добре змішуваний, в його структурі не повинно бути розшарувань, порожнин та включень інших речовин, які не передбачені в рецептурі. Також матеріал повинен відповідати вимогам по екологічності та токсичності.

Після формування маркетингової моделі товару слід особливо відмітити – чим саме проект буде захищено від копіювання. Захист може бути організовано за рахунок захисту ідеї товару (захист інтелектуальної власності), або ноу-хау, чи комплексне поєднання властивостей і характеристик, закладене на другому та третьому рівнях товару.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субституту, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (таблиця 5.19). Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 5.19 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	400-800 грн/1 упаковка	500-800 грн – ціни невисокі	Підприємства великі, середні та малі(цехи)	200-800 грн/1 консультація, в онлайні безкоштовно.

Продовження таблиці 5.19 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
2.	Сама модернізація робиться коштом підприємства (клієнта) оплата йде тільки за обсяги роботи. 80 грн / година роботи	Розробка нового обладнання 120 грн/1 год	Дивлячись від розміру підприємства (клієнта) та обсягів виконання: 200 -6000 грн/1 год (для всього колективу)	200 грн/1год (для всього колективу)

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (таблиця 5.20):

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 5.20 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Закупівля оптом	Якість товару, потрібні характеристик и, швидкість перевезення до клієнта	Нульового рівня - виробник сам продає товар кінцевому споживачеві, прямі канали розподілу	Через інтернет на веб-сайті та в інформаційних мережах

Продовження таблиці 5.20 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
2.	В роздріб	Швидкість перевезення на точку збуту	Дворівневий - між виробником і покупцем послідовно існують оптовий і роздрібний продавці	Через інтернет на веб-сайті та безпосередньо на місці проведення продажу
3.	Консультування при виникненні питань та пропозицій	Виконання роботи та складання	Однорівневий	Через інтернет по телефону, відеоконференціях та на місці

Система збуту товарів - ключова ланка комерційної діяльності й свого роду фінішний комплекс у всій діяльності фірми по створенню, виробництву й доведенню товару до споживача. Власне, саме тут споживач або визнає, або не визнає всі зусилля підприємства корисними і потрібними для себе і, відповідно, купує або не купує її продукцію і послуги.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (таблиця 5.21).

Таблиця 5.21 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Розв'язок проблем в діяльності	Інтернет та соціальні мережі	Запевнення в швидкості та якості, створення партнерських стосунків з клієнтом.	Запевнити в швидкому розв'язку та відповіді на всі питання, що турбують.	«!!!Якісні полімерні композиційні матеріали для Вас»
2.	Пошук варіантів розвитку клієнта (покращення параметрів, зменшення затрат тощо).	Інтернет та соціальні мережі, реклама	Надання всієї інформації про Нас, надання гарантій та картки клієнта з подальшим сервісом.	Показати перелік наших послуг та надати інформацію для звернення.	«Рушійна сила інновацій»
3.	Бажання здійснити вигідну покупку, що буде актуальною тривалий час.	Інтернет та соціальні мережі, відеочати, реклама виставки та друкована продукція	Надання всієї інформації та гарантія на покупку.	Показати перелік наших послуг та надати інформацію для звернення.	«Обирайте найкращі пропозиції»

Результатом останнього пункту має стати ринкова (маркетингова) програма, що включає в себе концепції товару, збуту, просування та попередній аналіз можливостей ціноутворення, спирається на цінності та потреби потенційних клієнтів, конкурентні переваги ідеї, стан та динаміку ринкового середовища, в межах якого буде впроваджено проект, та відповідну обрану альтернативу ринкової поведінки.

5.6 Висновки

В процесі розробки стартап проекту було розроблено висновки, що можлива ринкова комерціалізація проекту. На користь цього свідчить наявність попиту, що виражена потребою.

Полімерні композиційні матеріали отримують нові механічні властивості, що робить ці матеріали затребуваними в багатьох галузях промисловості. Ринок полімерних матеріалів в Україні є перспективним в розвитку. Маркетингові дослідження обраного сегменту ринку оцінки рівня, динаміки конкуренції в базових та споріднених галузях та обґрунтовані фактори конкуренції формують особливості даного ринку. Особливостями даного ринку є конкурентоспроможність продукції на якості та відповідності до екологічних та технологічних нормативів.

Спроможність стартап проекту дозволяє стверджувати про перспективи створення та розвитку стартапу.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота спрямована на вирішення важливої науково-технічної задачі – дослідження процесу екструзії полімер-каучукових сумішей, які можуть застосовуватись для виробів та деталей, що мають високі вимоги до антифрикційних властивостей, а саме, внутрішнього антифрикційного шару захисної поліетиленової труби для оптоволоконних мереж зв'язку.

1. За результатами літературного огляду сформульовано задачі дослідження процесу змішування неоднорідних полімер-каучукових композицій, визначено особливості проведення процесу та обладнання.

2. Сформульовано та обґрунтовано фізичну модель процесу течії розплаву у робочих зазорах змішувального елемента.

3. Розроблено та уточнено математичну модель процесу течії розплаву у робочих зазорах змішувального елемента, проведено її чисельний розв'язок.

4. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень обґрунтовано методику проектного розрахунку нових конструкцій змішувальних елементів у відповідності до реологічних характеристик перероблюваного матеріалу та необхідної якості змішування.

5. Експериментально визначено основні реологічні параметри поліетилен–каучукової композиції з вмістом каучуку 10%, та встановлено, що розплав є неньютонівською рідиною і з достатньою точністю описується степеневим законом, реологічні параметри розплаву були використані для розв'язання математичної моделі процесу. Визначений коефіцієнт консистентності становить $K = 472 \text{ Па}\cdot\text{с}^n$, а показник степеню неньютонівської поведінки $n = 0,728$.

6. Проведено віртуальний експеримент у середовищі SolidWorks процесу течії розплаву у робочих зазорах змішувального елемента.

7. Підтверджено значимість результатів чисельного експерименту до результатів натурального експерименту, та віртуального, що підтверджує адекватність математичної моделі.

8. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано модернізацію конструкції шнеку для змішування високов'язких розплавів полімерів, а саме, для запобігання термічній деструкції полімеру встановлено додатковий пристрій для внутрішнього охолодження зони змішувального елементу, та встановлення на черв'як після змішувального елементу Меддока дистрибутивного змішувального елементу.

9. Розроблено рекомендації щодо проектування конструкцій змішувальних елементів, та визначено вплив геометричних параметрів змішувального елементу на ефективність проведення процесу змішування.

10. Результати роботи можуть бути застосовані для розробки та проектування нових конструкцій змішувальних елементів, розроблені програми розрахунку для визначення реологічних параметрів розплаву неньютонівських рідин методом капілярної віскозиметрії.

11. Результати роботи опубліковано у двох статтях в міжнародному науковому журналі, апробовано на 6 міжнародних науково–практичних конференціях, подано 2 патенти на корисну модель України та отримано позитивне рішення на їх публікацію.

ВЫВОДЫ

Диссертационная работа направлена на решение важной научно-технической задачи - исследование процесса экструзии полимер-каучуковых смесей, которые могут применяться для изделий и деталей, имеющих высокие требования к антифрикционным свойствам, а именно, внутреннего антифрикционного слоя защитной полиэтиленовой трубы для оптоволоконных сетей связи.

1. По результатам литературного обзора сформулированы задачи исследования процесса смешивания неоднородных полимер-каучуковых композиций, определены особенности проведения процесса и оборудования.

2. Сформулировано и обосновано физическую модель процесса течения расплава в рабочих зазорах смесительного элемента.

3. Разработана и уточнена математическая модель процесса течения расплава в рабочих зазорах смесительного элемента, проведено ее численное решение.

4. По результатам теоретических и экспериментальных исследований обоснована методика проектного расчета новых конструкций смесительных элементов в соответствии с реологическими характеристиками перерабатываемого материала и необходимого качества смешивания.

5. Экспериментально определены основные реологические параметры полиэтилен-каучуковой композиции с содержанием каучука 10%, и установлено, что расплав является неньютоновской жидкостью и с достаточной точностью описывается степенным законом, реологические параметры расплава были использованы для решения математической модели процесса. Определенный коэффициент консистенции составляет $K = 472 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$, а показатель степени неньютоновской поведения $n = 0,728$.

6. Проведен виртуальный эксперимент в среде SolidWorks процесса течения расплава в рабочих зазорах смесительного элемента.

7. Подтверждено значимость результатов численного эксперимента к результатам натурального эксперимента, и виртуального, что подтверждает адекватность математической модели.

8. По результатам теоретических и экспериментальных исследований предложена модернизация конструкции шнека для смешивания высоковязких расплавов полимеров, а именно, для предотвращения термической деструкции полимера установлено дополнительное устройство для внутреннего охлаждения зоны смесительного элемента, и установки на червь после смесительного элемента Меддока дистрибутивного смесительного элемента.

9. Разработаны рекомендации по проектированию конструкций смесительных элементов, и определено влияние геометрических параметров смесительного элемента на эффективность проведения процесса смешивания.

10. Результаты работы могут быть использованы для разработки и проектирования новых конструкций смесительных элементов, разработаны программы расчета для определения реологических параметров расплава неньютоновских жидкостей методом капиллярной вискозиметрии.

11. Результаты работы опубликованы в двух статьях в международном научном журнале, апробированы на 6 международных научно-практических конференциях, подано 2 патента на полезную модель Украины и получено положительное решение на их публикацию.

CONCLUSIONS

The dissertation is directed at solving an important scientific and technical problem - studying the process of extrusion of polymer-rubber mixtures, that can be used for products and components with high requirements for antifriction properties, namely, an internal antifriction layer of a protective polyethylene pipe for fiber optic communication networks .

1. By the results of the literary review formulated the tasks of studying the process of mixing heterogeneous polymer-rubber compositions, defined the specificities of the process and equipment.

2. Formulated and substantiated the physical model of the process of the melt flow in the working clearances of the mixing element.

3. Developed and refined the mathematical model of the process of the melt flow in the working clearances of the mixing element , and its numerical solution has been carried out.

4. According to the results of theoretical and experimental research proposed the method of design calculation of new constructions of mixing elements in accordance with the rheological characteristics of the processed material and the required mixing quality.

5. The basic rheological parameters of a polyethylene rubber composition with a rubber content of 10% were determined experimentally, and it was established that the melt is a non-newtonian fluid and is described with sufficient accuracy by the power law, and the rheological parameters of the melt were used to solve the mathematical model of the process. The defined consistency coefficient is $K = 472 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$, and the non-newtonian behavior index $n = 0.728$.

6. A virtual experiment was conducted in the SolidWorks environment of the melt flow process in the working gaps of the mixing element.

7. Was confirmed the significance of the results of the numerical experiment to the results of the natural experiment, and the virtual, which confirms the adequacy of the mathematical model.

8. According to the results of theoretical and experimental research, the modernization of the screw design for mixing high-viscosity polymer melts, namely, to prevent the thermal destruction of the polymer, has been provided with an additional device for internal cooling of the mixing zone, and the installation on the worm after the Maddock mixing element, the distributive mixing element.

9. Determined the recommendations for the designing of the mixing element structures have been developed, and the influence of the geometrical parameters of the mixing element on the efficiency of the mixing process.

10. The results of the work can be applied to design and design of new structures of mixing elements, developed programs for calculating the rheological parameters of the melt of non-newtonian fluids by capillary viscometer method.

11. The results of the work are published in two articles in the international scientific journal, tested at 6 international scientific conferences, submitted 2 patents to the utility model of Ukraine and a positive decision got for their publication.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових журналах:

1. Гоцький Я. Г., Двойнос Я. Г. **Захисні поліетиленові труби для оптоволоконних кабелів зв'язку** // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". – 2018. – №7 с. 41 - 44.

2. Гоцький Я. Г., Двойнос Я. Г. **Математичне моделювання процесу гомогенізації розплаву композиції поліетилен – каучук** // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". – 2018. – №7 с. 45 – 50.

Особистий внесок здобувача: підготовка експерименту, проведення досліджень та участь в аналізі результатів, підготовка до опублікування.

Патенти на корисні моделі та винаходи:

1. Заявка на патент України. МПК В29С 47/80, В29С 47/36, В29С 47/88. Шнек екструдера для переробки полімерних матеріалів. Я.Г. Гоцький, Я.Г. Двойнос; заявники вони ж. – № u 2017 09630; заявл. 02.10.2017.

2. Заявка на патент України. МПК В29С 47/60, В30В 11/24. Змішувальна секція черв'яка екструдера. Я.Г. Гоцький, Р.В. Кичак; заявники вони ж. – № u 2018 02087; заявл. 28.02.2018.

Тези і матеріали наукових конференцій:

1. Гоцький Я. Г. **ЗАХИСНІ ПОЛІЕТИЛЕНОВІ ТРУБИ ДЛЯ ОПТОВОЛОКОННИХ КАБЕЛІВ ЗВ'ЯЗКУ З АНТИФРИКЦІЙНИМ ВНУТРІШНІМ ШАРОМ.** Гоцький Я. Г., Двойнос Я.Г. // Збірник праць VI Міжнародної науково–практичної конференції "Інноваційні енерготехнології" ОНАХТ, 2017 - с. 157-161.

2. Гоцький Я. Г. **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ РОЗПЛАВУ КОМПОЗИЦІЇ ПОЛІЕТИЛЕН – КАУЧУК.** Гоцький Я. Г., Двойнос Я.Г. // Збірник праць VI Міжнародної науково–

практичної конференції " Інноваційні енерготехнології" ОНАХТ, 2017 - с. 127-130.

3. Гоцький Я. Г. «ЗАХИСНІ ПОЛІЕТИЛЕНОВІ ТРУБИ ДЛЯ ОПТОВОЛОКОННИХ КАБЕЛІВ ЗВ'ЯЗКУ» / Гоцький Я. Г., ст. викл. Двойнос Я. Г. // Збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання», м. Київ: Видавництво «УВОІ» «Допомога» УСІ» 2016.

4. Гоцький Я. Г. «ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ РОЗПЛАВУ КОМПОЗИЦІЇ ПОЛІЕТИЛЕН-КАУЧУК» / Гоцький Я. Г., ст. викл. Двойнос Я. Г. // Збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання», м. Київ: Видавництво «УВОІ» «Допомога» УСІ» 2017.

5. Гоцький Я. Г. «ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІЕТИЛЕН-КАУЧУКОВИХ КОМПОЗИЦІЙ» / Гоцький Я. Г., ст. викл. Двойнос Я. Г. // Збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання», м. Київ: Видавництво «УВОІ» «Допомога» УСІ» 2017.

6. . Гоцький Я. Г. «МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ РОЗПЛАВУ КОМПОЗИЦІЇ ПОЛІЕТИЛЕНУ ТА КАУЧУКУ» / Гоцький Я. Г., ст. викл. Двойнос Я. Г. // Збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання», м. Київ: Видавництво «УВОІ» «Допомога» УСІ» 2018.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Суберляк О. В. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів : підруч. / О.В. Суберляк, П.І. Баштанник. – Львів : Растр-7, 2007. – 374 с. – ISBN 978-966-2004-01-4.
2. Джурка Г.Ф., Полімерні композиційні матеріали - Полтава, 2008 – 58 с.
3. Гоцький Я. Г. ЗАХИСНІ ПОЛІЕТИЛЕНОВІ ТРУБИ ДЛЯ ОПТОВОЛОКОННИХ КАБЕЛІВ ЗВ'ЯЗКУ З АНТИФРИКЦІЙНИМ ВНУТРІШНІМ ШАРОМ. Гоцький Я. Г., Двойнос Я.Г. // Збірник праць VI Міжнародної науково–практичної конференції " Інноваційні енерготехнології" ОНАХТ, 2017 - с. 157-161.
4. Ким В. С., Скачков В. В. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пласт-масс. – М.: Химия, 1988. – 240 с., ил.
5. Reiloy WESTLAND.Barrel s screw handbook Reiloy/ – f puplication of Reiloy Westland Corporation ninth edition 1997 – 2012.: 58p.
6. <https://www.battenfeld-cincinnati.com/products/extruders/single-screw-extruders-for-pipe.html> дата звернення 05.12.2017. [Електронний ресурс] дата звернення 12. 03 2018.
7. <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B7%D0%B8%D1%82%D0%B8> [Електронний ресурс] дата звернення 05. 02 2018.
8. Pavel Kubik, Investigations of polymer melt flow through different mixinglements and waving screw channels/ Doctoral thesis 2014 – 132 p.
9. Спорягін, Е. О., Теоретичні основи та технологія виробництва полімерних композиційних матеріалів : навч. посіб. / Е. О. Спорягін, К. Є. Варлан. – Д. : Вид-во ДНУ, 2012. – с. ISBN
10. Раувендааль К. Экструзия полимеров / пер. с англ. под ред. А. Я.

Малкина. - СПб.: Профессия, 2008.

11. Радченко Л. Б. Сівецький В. І. Основи моделювання і конструювання черв'ячних екструдерів: Навч. посіб. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»” , 2002 . – 152 с.

12. Мак-Келви, Д. М. Переработка полимеров [Текст] / Д. М. Мак-Келви, – М.: Химия, – 1965. – 442 с.

13. Бернхард, Э. Переработка термопластичных материалов [Текст] / Э. Бернхард, – М.: Химия, – 1965. – 748 с.

14. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. Пер. с англ. – М. Химия, 1984. – 632 с., ил. – Нью-Йорк. 1979.

15. Ким В. С. Теория и практика экструзии полимеров. – М.: Химия, КолосС, 2005. – 568 с.

16. Торнер Р. В., Акутин М. С. Оборудование заводов по переработке пластмасс. – М.: Химия , 1986. – 400 с., ил.

17. Теплофизические и реологические характеристики полимеров : справочник /[А. И. Иванченко, В. А. Пахаренко, В. П. Привалко и др.]. — К. : Наук. думка, 1977. – 44 с.

18. Теплофизические и реологические характеристики и коэффициенты трения наполненных термопластов : справочник / под ред. Ю.С. Липатова. — К. : Наукова думка,

19. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

20. <http://www.ukrexport.gov.ua/ukr/prom/ukr/14.html> [Електронний ресурс] дата звернення 5. 05 2018.

21. http://valest.com.ua/ua/news/news_02 [Електронний ресурс] дата звернення 5. 05 2018.

22. <http://polymercenter.com.ua/> [Електронний ресурс] дата звернення 5. 05 2018. [Електронний ресурс] дата звернення 5. 05 2018.

23. Форсайт економіки України: середньостроковий (2015–2020 роки) і довгостроковий (2020–2030 роки) часові горизонти / наук. керівник проекту акад. НАН України М. З. Згуровський // Міжнародна рада з науки (ICSU); Комітет із системного аналізу при Президії НАН України; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»; Інститут прикладного системного аналізу НАН України і МОН України; Світовий центр даних з геоінформатики та сталого розвитку. — Київ : НТУУ «КПІ», 2015. — 136 с. ISBN 978-966-622-716-7.

24. Yudina N.V. Methods of the Startup-Project Developing Based on ‘the Four-Dimensional Thinking’ in Information Society // Marketing and Management of innovations. – 3’2017. – P.245-256.-DOI:10.21272/mmi.2017.3-23 Access mode : <http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/journals/2017/3/245-256>.

25. Юдіна Н.В. Міждисциплінарні платформи стартап-проектів [Електронний ресурс] // Міждисциплінарні дискусії : Матеріали науково-теоретичного семінару «Міждисциплінарні дослідження: теоретико-методологічні виміри», 5 грудня 2017 р. – Київ, Київський національний університет імені Тараса Шевченка Інститут міжнародних відносин Навчально-науковий центр «Синтез». – 2017. – С. 20-24. - Режим доступу [http://mail.iir.edu.ua/uploads/files/tezi%20ceminar%20synthesis%205%2012%202017%20final%20\(1\).pdf](http://mail.iir.edu.ua/uploads/files/tezi%20ceminar%20synthesis%205%2012%202017%20final%20(1).pdf).

26. Юдіна Н. В. Визначення циклічних залежностей в економіці України на основі аналізу окремих макроекономічних показників. Економічний Вісник НТУУ «КПІ». №13(2016). <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/80084/75643>

27. Юдина Н. В. Антикризисные маркетинговые инструменты инновационного развития предприятий / Н.В. Юдина // Маркетинг и финансы. – 2014. – Т. 1. – С. 60– 72.

28. Юдіна Н.В. Управління майбутнім на основі концепції інноваційного розвитку // Антикризове управління економікою України: нові виклики. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, КНЕУ ім. В.Гетьмана, 15-17 грудня 2015 року). – 2015. - С. 124-127. – Режим доступу : http://futurollog.com.ua/blog_konferencia_kneu_2015_12_15.phtml.

29. Юдіна Н.В. Управління майбутнім на основі концепції інноваційного розвитку // Антикризове управління економікою України: нові виклики. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, КНЕУ ім. В.Гетьмана, 15-17 грудня 2015 року). – 2015. - С. 124-127. – Режим доступу : http://futurollog.com.ua/blog_konferencia_kneu_2015_12_15.phtml.

30. Заявка на патент України. МПК В29С 47/80, В29С 47/36, В29С 47/88. Шнек екструдера для переробки полімерних матеріалів. Я.Г. Гоцький, Я.Г. Двойнос; заявники вони ж. – № u 2017 09630; заявл. 02.10.2017.

31. Заявка на патент України. МПК В29С 47/60, В30В 11/24. Змішувальна секція черв'яка екструдера. Я.Г. Гоцький, Р.В. Кичак; заявники вони ж. – № u 2018 02087; заявл. 28.02.2018.

Додаток А

**Програма розрахунку математичної моделі процесу течії розплаву в
робочих зазорах змішувального елемента**

Таблиця А. 1 Таблиця ідентифікаторів

Ідентифікатор	Значення ідентифікатора	Розмірність
h	Глибина зазору	м
l	Довжина зазору	м
n	Швидкість обертів черв'яка	об/хв
G	Продуктивність	кг/год
D	Діаметр циліндру	м
B	Ширина зазору	м
nz	Кількість зазорів	од.
nk	Кількість напірних каналів	од.
k	Коефіцієнт консистентності	Па·с ⁿ
nr	Степінь консистентності	-
ρ	Густина розплаву	кг/м ³
Cp	Теплоємність розплаву	Дж/(кг·К)
V	Об'ємна витрата	м ³ /с
ik	Розбивок по висоті	-
Dy	Сітка кінцево-різницевої схеми	м
y	Координата по висоті зазору	м
Wy0	Швидкість на нижній стінці	м/с
Wyh	Швидкість на верхній стінці	м/с
τ ₀	Орієнтовне напруження зсуву	Па
τ _{xn}	Дотичні напруження набігаючому зазорі	Па
τ _{xz}	Дотичні напруження збігаючому зазорі	Па
W _{xn}	Величина швидкості у набігаючому зазорі	м/с
W _{xz}	Величина швидкості у збігаючому зазорі	м/с

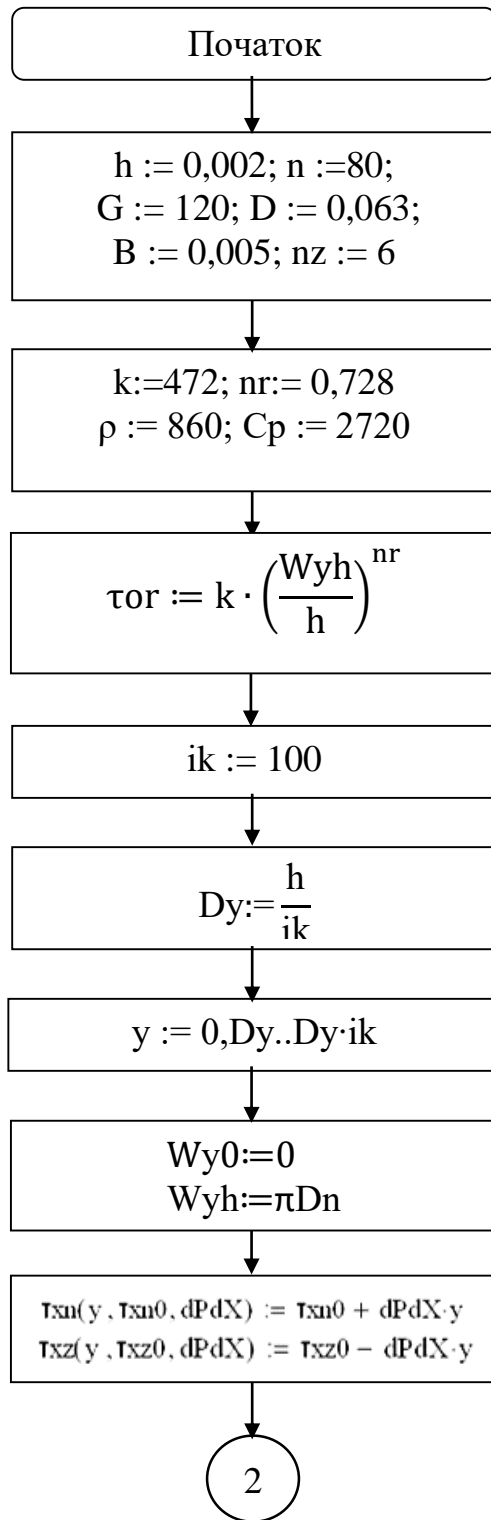
Продовження таблицю А. 1 Таблиця ідентифікаторів

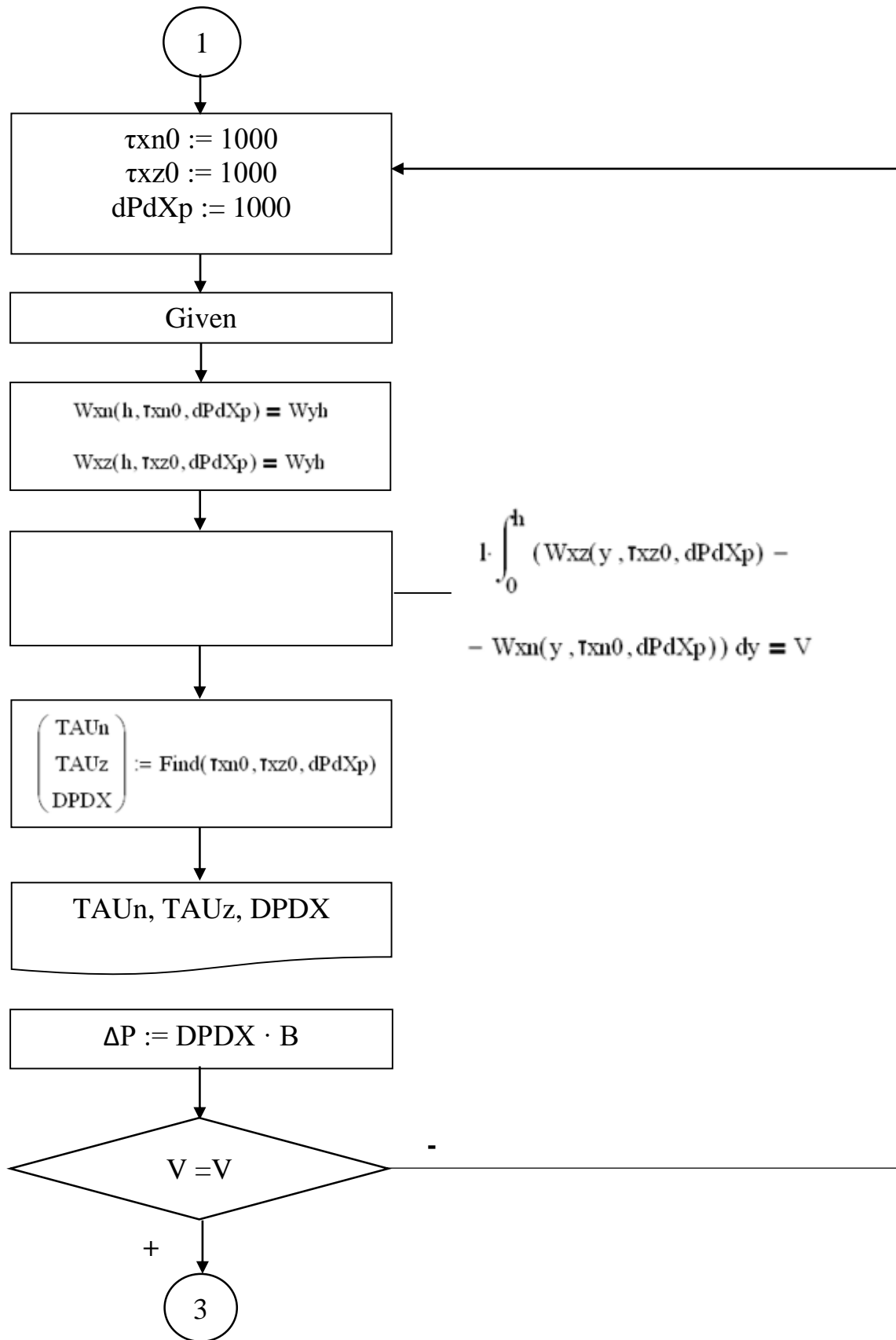
Ідентифікатор	Значення ідентифікатора	Розмірність
τ_{xn0}	Початкове значення дотичних напружень	Па
τ_{xz0}	Початкове значення дотичних напружень	Па
$dPdXp$	Початкове значення градієнт тиску	Па/м
$W_{xn}(0, \tau_{xn0}, dPdXp)$	Величина швидкості на нижній стінці зазору в набігаючому зазорі	м/с
$W_{xz}(0, \tau_{xz0}, dPdXp)$	Величина швидкості на нижній стінці зазору у збігаючому зазорі	м/с
$W_{xn}(h, \tau_{xn0}, dPdXp)$	Величина швидкості на верхній стінці зазору в набігаючому зазорі	м/с
$W_{xz}(h, \tau_{xz0}, dPdXp)$	Величина швидкості на верхній стінці зазору у збігаючому зазорі	м/с
$TAUn$	Визначена величина дотичного в набігаючому зазорі	Па
$TAUz$	Визначена величина дотичного напруження в збігаючому зазорі	Па
$DPDX$	Визначений значення градієнту тиску	Па/м
ΔP	Перепад тиску в зазорі	Па
$W_{xn}(y, TAUn, DPDX)$	Функція швидкості від висоти каналу, напружень та градієнту тиску	м/с
$W_{xz}(y, TAUz, DPDX)$	Функція швидкості від висоти каналу, напружень та градієнту тиску	м/с
$\gamma_{ixn}(y)$	Швидкість зсуву у набігаючому зазорі	c^{-1}
$\gamma_{ixz}(y)$	Швидкість зсуву у збігаючому зазорі	c^{-1}
$\tau_{xn}(y, TAUn, DPDX)$	Функція напружень зсуву від висоти каналу, напружень та градієнту тиску	Па

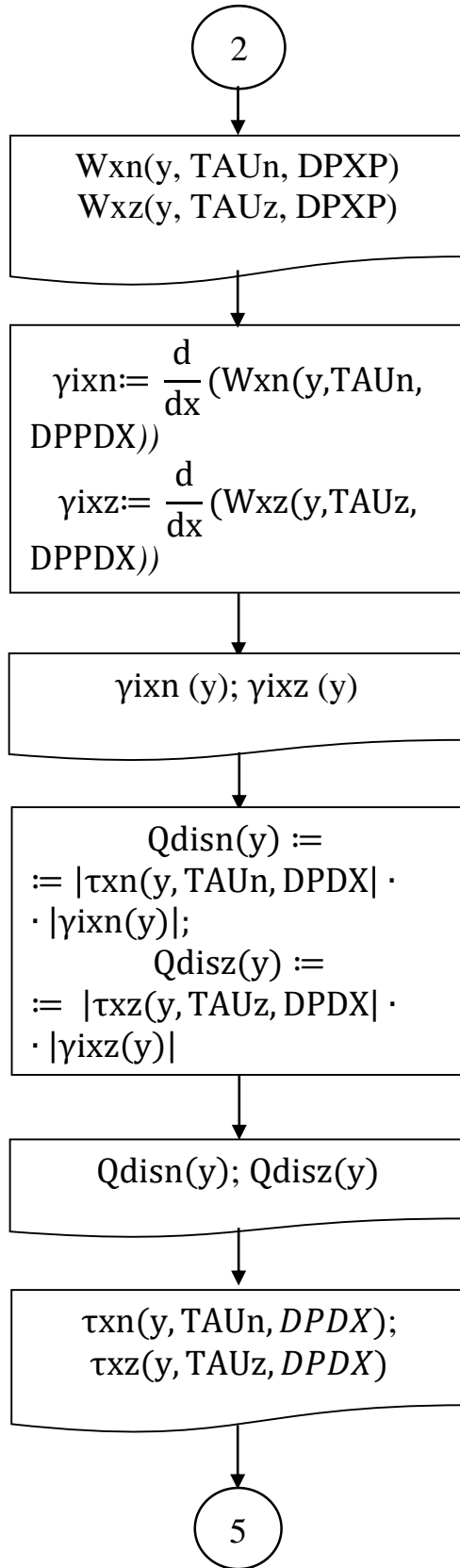
Продовження таблицю А. 1 Таблиця ідентифікаторів

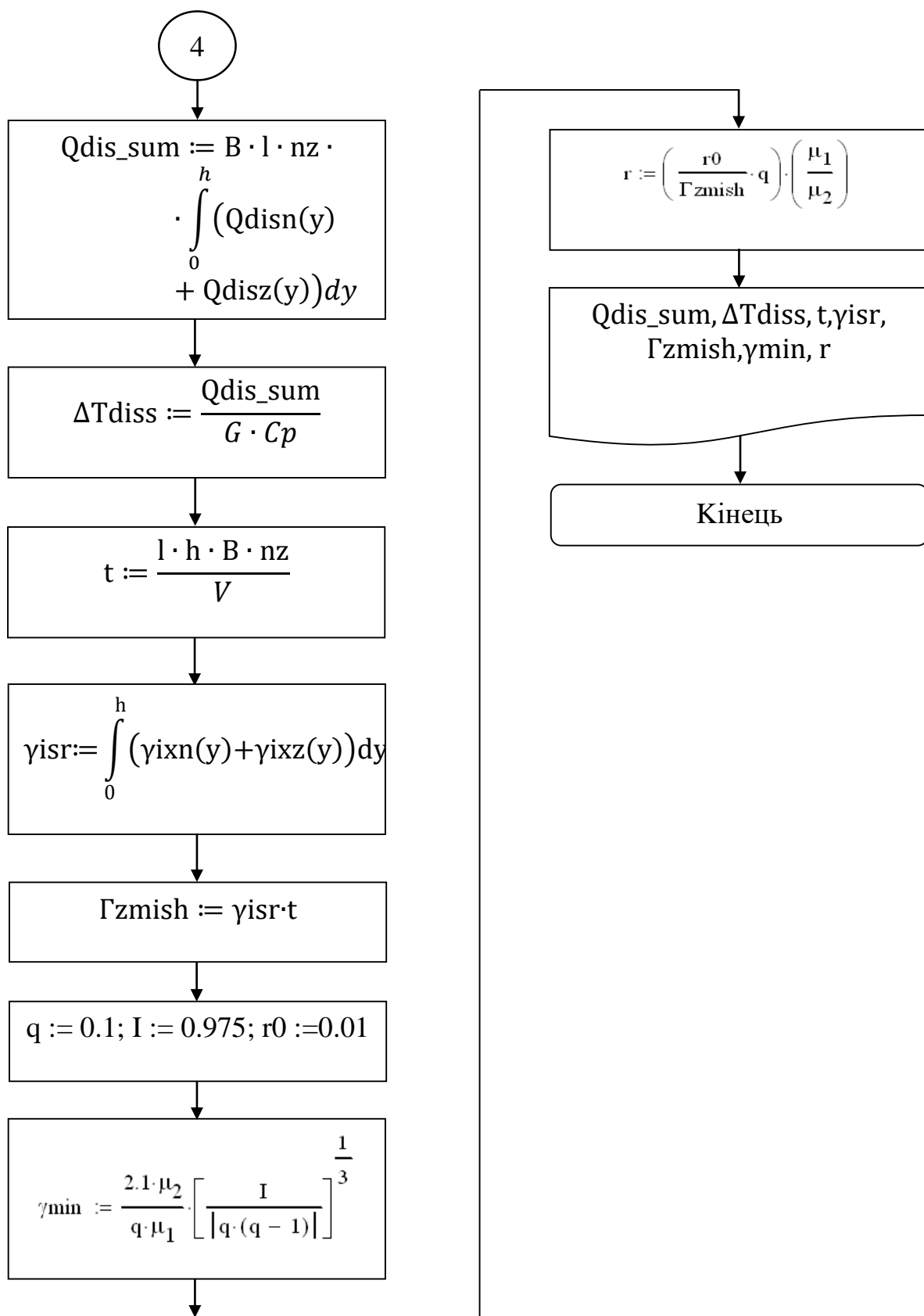
Ідентифікатор	Значення ідентифікатора	Розмірність
$\tau_{xz}(y, \tau_{AUz}, \text{DPDX})$	Функція напружень зсуву від висоти каналу, напружень та градієнту тиску	Па
$Q_{\text{dis_sum}}$	Сумарна потужність дисипації	Вт
ΔT_{diss}	Температура розплави після робочого заору	°C
t	Час перебування	с
γ_{sr}	Середня швидкість зсуву	с^{-1}
j	Кількість розбивок по висоті	-
jk	Розбивка по висоті	м
Γ_{zmishu}	Накопичена деформація зсуву	-
μ_1	В'язкість дисперсного середовища	Па·с
μ_2	В'язкість диспергованої фази	Па·с
q	Об'ємна концентрація диспергованої фази	-
I	Критерій змішування	-
γ_{min}	Мінімально-допустима швидкість зсуву для забезпечення змішування	с^{-1}
r_0	Початкова довжина полос	м
r	Кінцева середня довжина полос	м

**Блок схема програми розрахунку математичної моделі процесу течії
розплаву у робочих зазорах змішувального елемента**









Програма розрахунку математичної моделі процесу течії в зазорах змішувального елемента

Вхідні дані:

Варіант розрахунку: перевірочний розрахунок за заданою геометрією, продуктивністю та обертами визначає гідравлічний опір елемента

Глибина зазору, м

$$h := 0.002$$

Швидкість обертів черв'яка, об/хв

$$n := 80$$

Продуктивність по розплаву, кг/год

$$G := 120$$

Діаметр циліндру, м

$$D := 0.063$$

Ширина зазору, м

$$B := 0.005$$

Кількість зазорів на елементі Меддока, шт

$$nz := 6$$

Кількість напорних каналів, шт

$$nk := \frac{nz}{2} = 3$$

Довжина зазору, м

$$l := 0.1$$

Реологічні параметри розплаву:

Коефіцієнт констатентності

Степінь констатентності

$$k := 472$$

$$ng := 0.728$$

Густина розплаву, кг/м³

Теплоємність розплаву, Дж/(кг К)

$$\rho := 860$$

$$Cp := 2720$$

Переведення в одиниці СІ:

$$\underline{n} := \frac{n}{60} \quad \underline{G} := \frac{G}{3600}$$

Об'ємна витрата на одній парі зазорів, м³/с:

$$\underline{V} := \frac{G}{\rho \cdot nk} = 1.292 \times 10^{-5}$$

Сітка кінцево-різностної схеми

$$ik := 100$$

Сітка з кінцево-різностної схеми, м

$$Dy := \frac{h}{ik}$$

$$y := 0, Dy .. Dy \cdot ik$$

Граничні умови, м/с

$$Wy0 := 0 \quad Wyh := \pi \cdot D \cdot n = 0.264$$

Орієнтовне значення напруження зсуву, Па

$$\tau_{0r} := k \cdot \left(\frac{Wyh}{h} \right)^{nr} = 1.65 \times 10^4 \quad \rho \cdot \frac{Wyh^2}{2} = 29.945$$

Дотичні напруження як функція напруження на черв'яку та градієнту тиску і висоти по зазору для впускного на тиск зазору, Па

$$\tau_{xn}(y, \tau_{xn0}, dPdX) := \tau_{xn0} + dPdX \cdot y$$

Дотичні напруження як функція напруження на серцевині червяка та градієнту тиску і висоти по зазору для випускного від тиску зазору, Па

$$\tau_{xz}(y, \tau_{xz0}, dPdX) := \tau_{xz0} - dPdX \cdot y$$

Епюра швидкості зсуву течії розплаву для впускного на тиск зазору, м/с:

$$W_{xn}(y, \tau_{xn0}, dPdX) := W_{y0} + \int_0^y \left(\left| \frac{\tau_{xn}(y, \tau_{xn0}, dPdX)}{k} \right| \right)^{\left(\frac{1}{nr} - 1 \right)} \cdot \frac{\tau_{xn}(y, \tau_{xn0}, dPdX)}{k} dy$$

$$W_{xz}(y, \tau_{xz0}, dPdX) := W_{y0} + \int_0^y \left(\left| \frac{\tau_{xz}(y, \tau_{xz0}, dPdX)}{k} \right| \right)^{\left(\frac{1}{nr} - 1 \right)} \cdot \frac{\tau_{xz}(y, \tau_{xz0}, dPdX)}{k} dy$$

Початкові значення:

$$\tau_{xn0} := -50000$$

$$\tau_{xz0} := 10$$

$$dPdXp := 100000$$

Given

$$1 \cdot \int_0^h (W_{xz}(y, \tau_{xz0}, dPdXp) - W_{xn}(y, \tau_{xn0}, dPdXp)) dy = V$$

$$W_{xn}(0, \tau_{xn0}, dPdXp) = W_{y0}$$

$$W_{yh} = 0.264$$

$$W_{xn}(h, \tau_{xn0}, dPdXp) = W_{yh}$$

$$W_{y0} = 0$$

$$W_{xz}(0, \tau_{xz0}, dPdXp) = W_{y0}$$

$$W_{xz}(h, \tau_{xz0}, dPdXp) = W_{yh}$$

$$\begin{pmatrix} \tau_{AUn} \\ \tau_{AUz} \\ DPDX \end{pmatrix} := \text{Find}(\tau_{xn0}, \tau_{xz0}, dPdXp)$$

$$\tau_{AUn} = 7.237 \times 10^3 \text{ Па} \quad \tau_{AUz} = 2.515 \times 10^4 \text{ Па} \quad DPDX = 8.954 \times 10^6 \frac{\text{Па}}{\text{м}}$$

Перепад тиску на елементі, Па

$$\Delta P := \text{DPDX} \cdot l = 8.954 \times 10^5$$

$$\frac{\Delta P}{1000000} = 0.895 \quad \text{МПа}$$

$$V = 1.292 \times 10^{-5}$$

$$l \cdot \int_0^h (W_{xz}(y, \text{TAUz}, \text{DPDX}) - W_{xn}(y, \text{TAUn}, \text{DPDX})) dy = 1.292 \times 10^{-5}$$

$$W_{xn}(h, \text{TAUn}, \text{DPDX}) = 0.264$$

$$W_{xz}(h, \text{TAUz}, \text{DPDX}) = 0.264$$

$$W_{xn}(0.75 \cdot h, \text{TAUn}, \text{DPDX}) = 0.16$$

$$W_{xz}(0.75 \cdot h, \text{TAUz}, \text{DPDX}) = 0.233$$

$$W_{xn}(0.5 \cdot h, \text{TAUn}, \text{DPDX}) = 0.083$$

$$W_{xz}(0.5 \cdot h, \text{TAUz}, \text{DPDX}) = 0.18$$

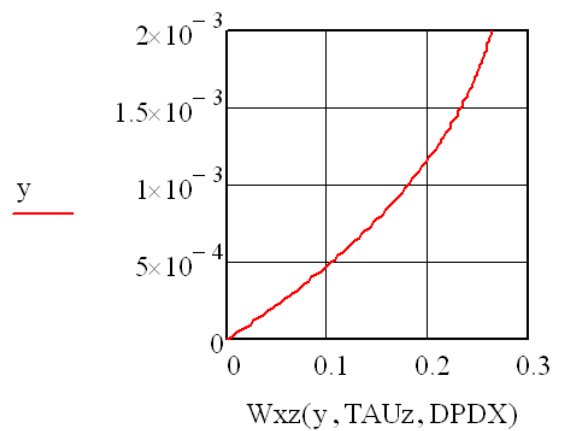
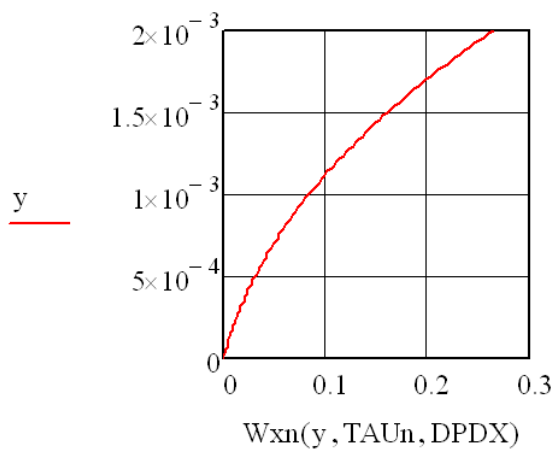
$$W_{xn}(0.1 \cdot h, \text{TAUn}, \text{DPDX}) = 9.993 \times 10^{-3}$$

$$W_{xz}(0.25 \cdot h, \text{TAUz}, \text{DPDX}) = 0.104$$

$$W_{xn}(0 \cdot h, \text{TAUn}, \text{DPDX}) = 0$$

$$W_{xz}(0 \cdot h, \text{TAUz}, \text{DPDX}) = 0$$

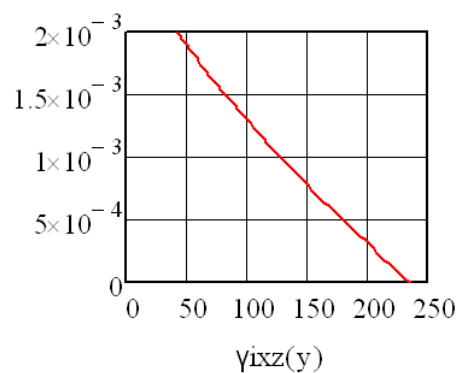
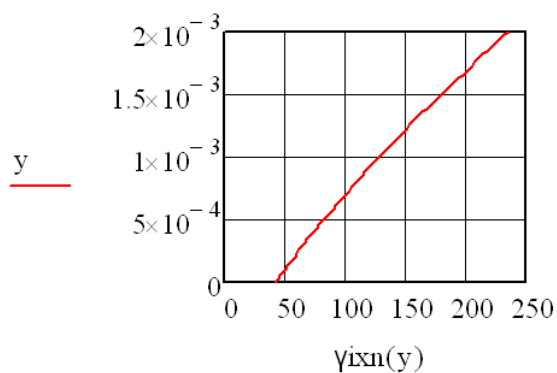
Епюра швидкості течії розплаву, м/с:



Швидкість зсуву, с-1

$$\dot{\gamma}_{ixn}(y) := \left| \frac{d}{dy} W_{xn}(y, \text{TAUn}, \text{DPDX}) \right|$$

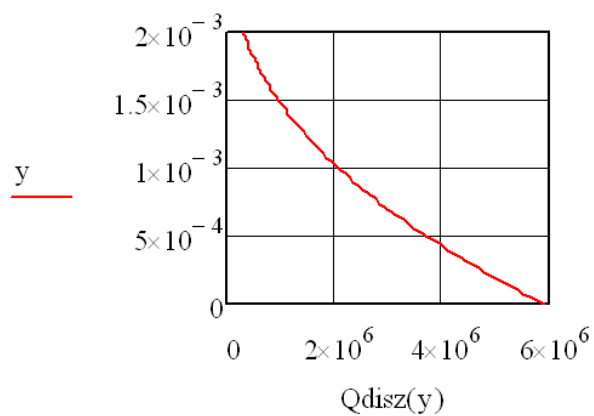
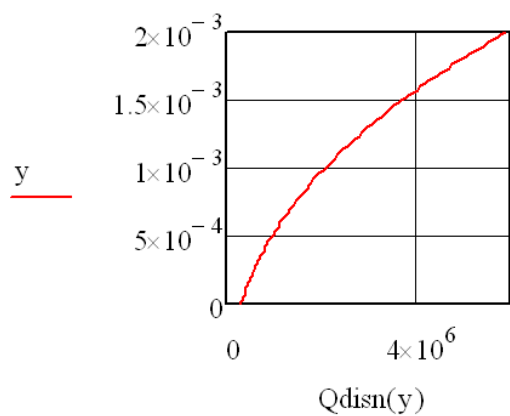
$$\dot{\gamma}_{ixz}(y) := \left| \frac{d}{dy} W_{xz}(y, \text{TAUz}, \text{DPDX}) \right|$$



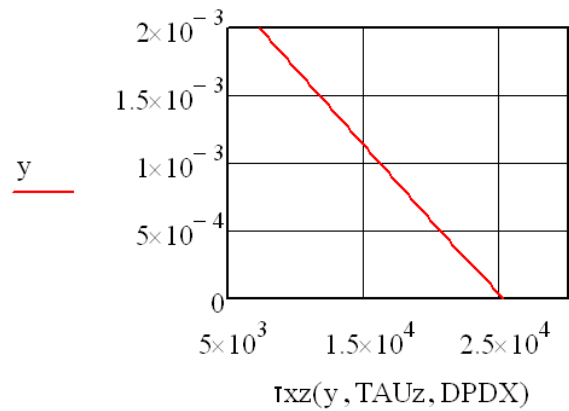
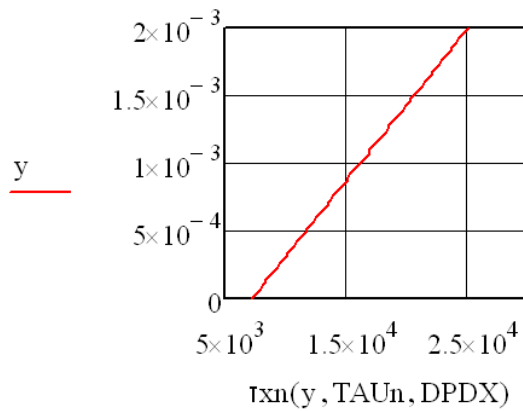
Енергія дисипації, Вт

$$Q_{disn}(y) := |I_{xn}(y, \text{TAUn}, \text{DPDX})| \cdot |\dot{\gamma}_{ixn}(y)|$$

$$Q_{disz}(y) := |I_{xz}(y, \text{TAUz}, \text{DPDX})| \cdot |\dot{\gamma}_{ixz}(y)|$$



Напруження зсуву в розплаві, Па



Загальна потужність енергії дисипації в усіх зазорах, Вт

$$Q_{dis_sum} := B \cdot l \cdot nz \cdot \int_0^h (Q_{disn}(y) + Q_{disz}(y)) dy = 29.108$$

$$jk := 100$$

$$j := 1, 2 \dots jk$$

$$Q_{dis_sum} := nz \cdot B \cdot l \cdot h \cdot \frac{1}{jk} \cdot \sum_{j=1}^{jk} \left(Q_{disn}\left(\frac{h}{jk} \cdot j\right) + Q_{disz}\left(\frac{h}{jk} \cdot j\right) \right) = 29.109$$

Перегрів розплаву у змішуючому елементі, 0C

$$\Delta T_{diss} := \frac{Q_{dis_sum}}{G \cdot C_p} = 0.321$$

Час перебування в зазорі, с:

$$t := \frac{l \cdot h \cdot B \cdot nz}{V} = 0.464$$

Середня швидкість зсуву у зазорах, с-1

$$\gamma_{sr} := \frac{1}{j_k} \cdot \sum_{j=1}^{j_k} \left[\sqrt{\left(\gamma_{ixn} \left(\frac{h}{j_k} \cdot j \right) \right)^2 + \left(\gamma_{ixz} \left(\frac{h}{j_k} \cdot j \right) \right)^2} \right] = 201.983$$

Накопичена деформація зсуву (якість перемішування):

$$\Gamma_{zmishu} := \gamma_{sr} \cdot t = 93.801$$

В'язкість дисперсійного середовища та дисперсної фази, Па*с

$$\mu_1 := k \cdot \gamma_{sr}^{n-1} = 111.403$$

$$\mu_2 := 32.145$$

Об'ємна концентрація диспергованої фази:

$$q := 0.1$$

+

Критерій змішування (задаємо) Торнер с.:

$$I := 0.975$$

Мінімальне значення деформації зсуву:

$$\gamma_{min} := \frac{2.1 \cdot \mu_2}{q \cdot \mu_1} \cdot \left[\frac{I}{|q \cdot (q - 1)|} \right]^{\frac{1}{3}} = 13.408$$

Початкова довжина полос, м:

$$r_0 := \frac{1}{100} = 0.01$$

$$\frac{0.04}{1000} = 4 \times 10^{-5}$$

Середня ширина полос, м

$$r := \left(\frac{r_0}{\Gamma_{zmish}} \cdot q \right) \cdot \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \right) = 3.695 \times 10^{-5}$$

$$\frac{r_0}{r} = 270.66$$

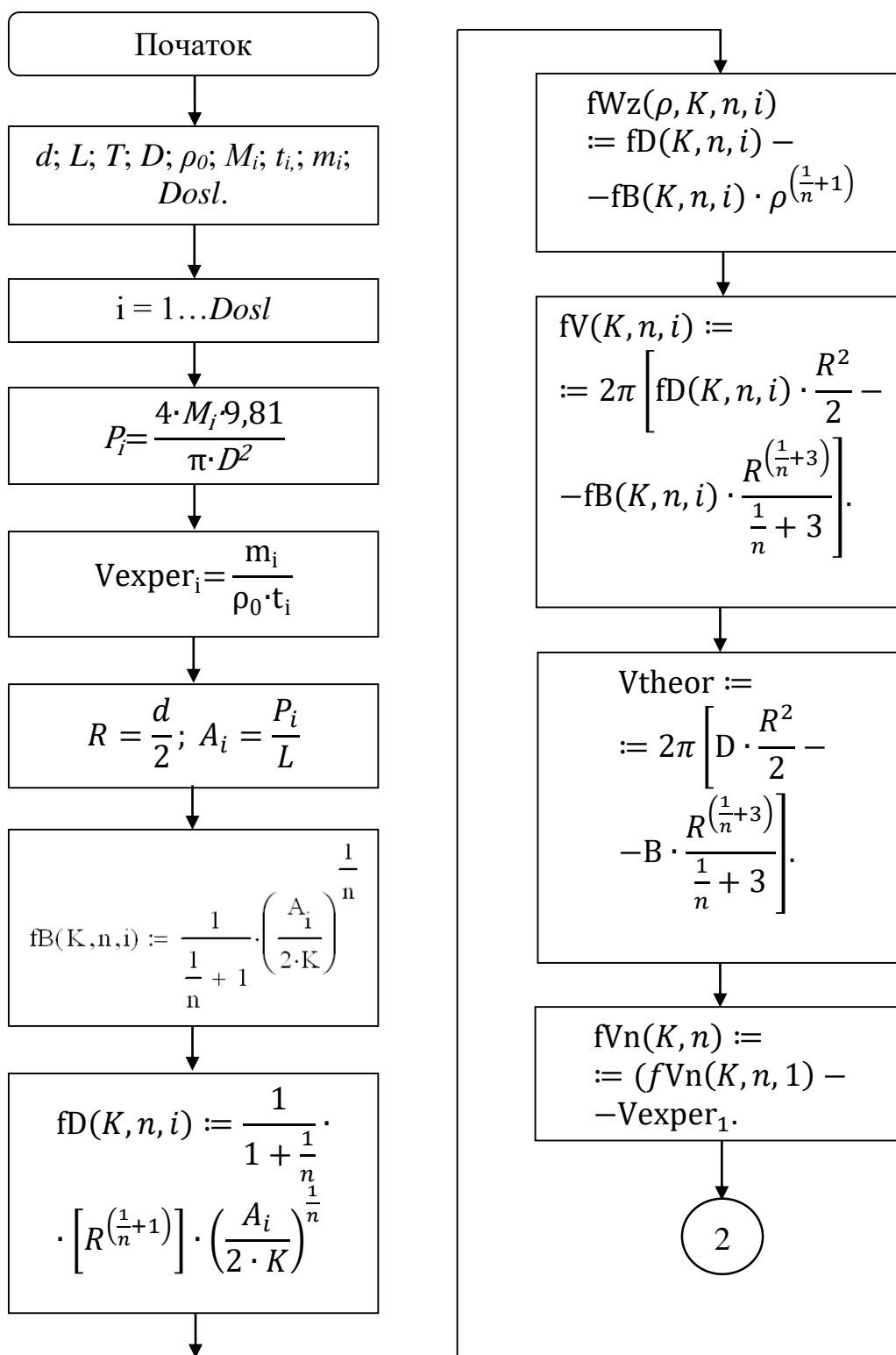
Додаток Б

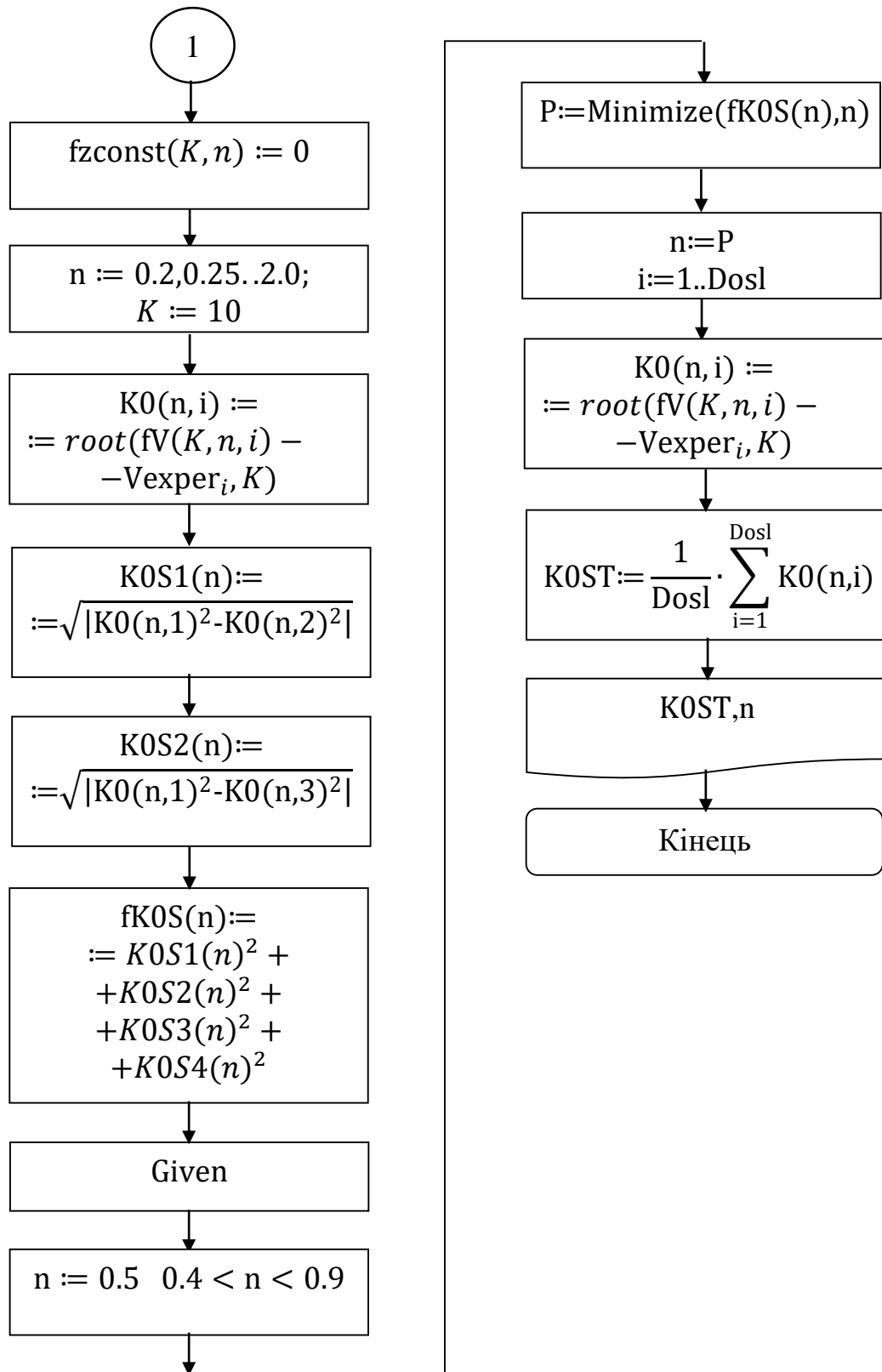
Програма розрахунку реологічних властивостей поліетилен – каучукової композиції

Таблиця Б. 1 Таблиця ідентифікаторів

Ідентифікатор	Значення ідентифікатора	Розмірність
ρ_0	Густина розплаву	кг/м ³
D	Діаметр поршня	м
L	Довжина сопла	м
d	Діаметр отвору у соплі	м
Dosl	Кількість вимірювань	шт.
M_i	Вага грузів	кг
t_i	Час вимірювань	с
m_i	Вага розплаву, що видавився	кг
K	Коефіцієнт консистентності	Па·с ⁿ
n	Степінь консистентності	-
P_i	Тиск перед соплом	Па
V_{exper_i}	Об'ємна витрата розплаву через сопло	м ³ /с
R	Радіус	м
Dy	Сітка кінцево-різницевої схеми	м
ρ	Циліндрична координата по радіусу капіляру	м
A_i	Гradient тиску	Па/м
KOS1(n)	Відстані між кривими	м
fKOS(n)	Сумарна квадратична відстань	м ²
KOST	Остаточний коефіцієнт консистентності	Па·с ⁿ
fWzn(ρ)	Функція швидкості у капілярі за заданими параметрами	м/с
fWzn1(ρ)	Функція швидкості у капілярі при n=0,2	м/с

**Блок схема програми розрахунку реологічних властивостей поліетилен –
каучукової композиції**





Програма обробки експериментальних даних капілярної віскозиметрії

Результати експериментальних даних:

Густина розплаву, кг/м³

$$\rho_o := 780$$

Діаметр поршня, м:

$$D := 0.0095$$

Довжина сопла, м:

$$L := 0.0082$$

Діаметр отвору у соплі, м:

$$d := 0.0013$$

Кількість вимірювань, шт.:

$$Dosl := 4 \quad i := 1 \dots Dosl$$

Вага грузів, кг:

$$M_1 := 3.755$$

$$M_2 := 4.955$$

$$M_3 := 5.395$$

$$M_4 := 2.795$$

Час вимірювань, с:

$$t_1 := 251$$

$$t_2 := 132$$

$$t_3 := 138$$

$$t_4 := 272$$

Вага розплаву, що видавився через сопло, кг:

$$m_1 := 0.000276$$

$$m_2 := 0.000250$$

$$m_3 := 0.000273$$

$$m_4 := 0.000218$$

n - показник ступеня нен'ютонівської поведінки, K - коеф. консистентності

Тиск перед соплом, Па:
$$P_i := \frac{4 \cdot M_i}{\pi \cdot D^2}$$

Об'ємна витрата розплаву через сопло, м³/с:
$$V_{\text{exper}_i} := \frac{m_i}{\rho_o \cdot t_i}$$

Радіус отвору у соплі, м:
$$R := \frac{d}{2}$$

Оскільки $\frac{dP}{dz} = \text{const}$, позначимо $\frac{dP}{dz} = A$
$$A_i := \frac{P_i}{L}$$

$$fB(K,n,i) := \frac{1}{\frac{1}{n} + 1} \cdot \left(\frac{A_1}{2 \cdot K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad fD(K,n,i) := \frac{1}{\frac{1}{n} + 1} \cdot \left[R^{\left(\frac{1}{n} + 1 \right)} \right] \cdot \left(\frac{A_1}{2 \cdot K} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$fWz(\rho,K,n,i) := fD(K,n,i) - fB(K,n,i) \cdot \rho^{\left(\frac{1}{n} + 1 \right)}$$

$$fV(K,n,i) := 2\pi \left[fD(K,n,i) \cdot \frac{R^2}{2} - fB(K,n,i) \cdot \frac{R^{\left(\frac{1}{n} + 3 \right)}}{\frac{1}{n} + 3} \right]$$

$$V_{theor} = 2\pi \left[D \frac{R^2}{2} - B \frac{R^{\left(\frac{1}{n} + 3 \right)}}{\frac{1}{n} + 3} \right]$$

Оскільки K та n - невідомі, рішенням рівняння буде множина рішень (крива на рисунку).

$$fVn(K,n) := \left(fV(K,n,1) - V_{exper_1} \right) \quad fzconst(K,n) := 0$$

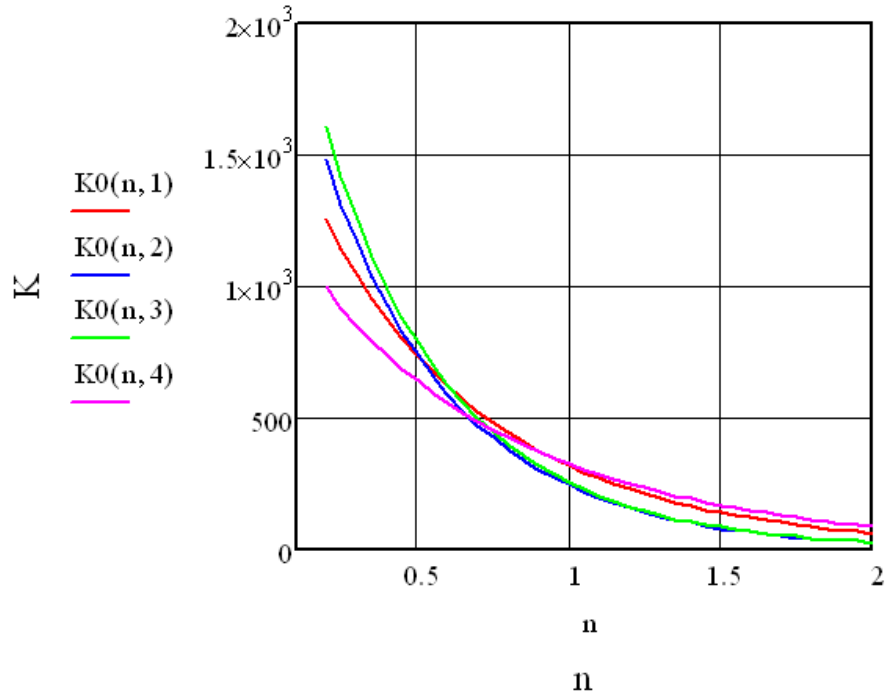
Початкові значення:

$$n := 0.2, 0.25 \dots 2.0 \quad \underline{K} := 10$$

$$\underline{K0}(n,i) := \text{root}\left(fV(K,n,i) - V_{exper_1}, K\right)$$

Коефіцієнти консистентності як функції від показника неньютонівської поведінки для різних експериментів:

$$\tau = K \gamma^n$$



Відстань між кривими (відшукати перетин кривих)

$$K0S1(n) := \sqrt{|K0(n,1)^2 - K0(n,2)^2|}$$

$$K0S3(n) := \sqrt{|K0(n,2)^2 - K0(n,3)^2|}$$

$$K0S2(n) := \sqrt{|K0(n,1)^2 - K0(n,3)^2|}$$

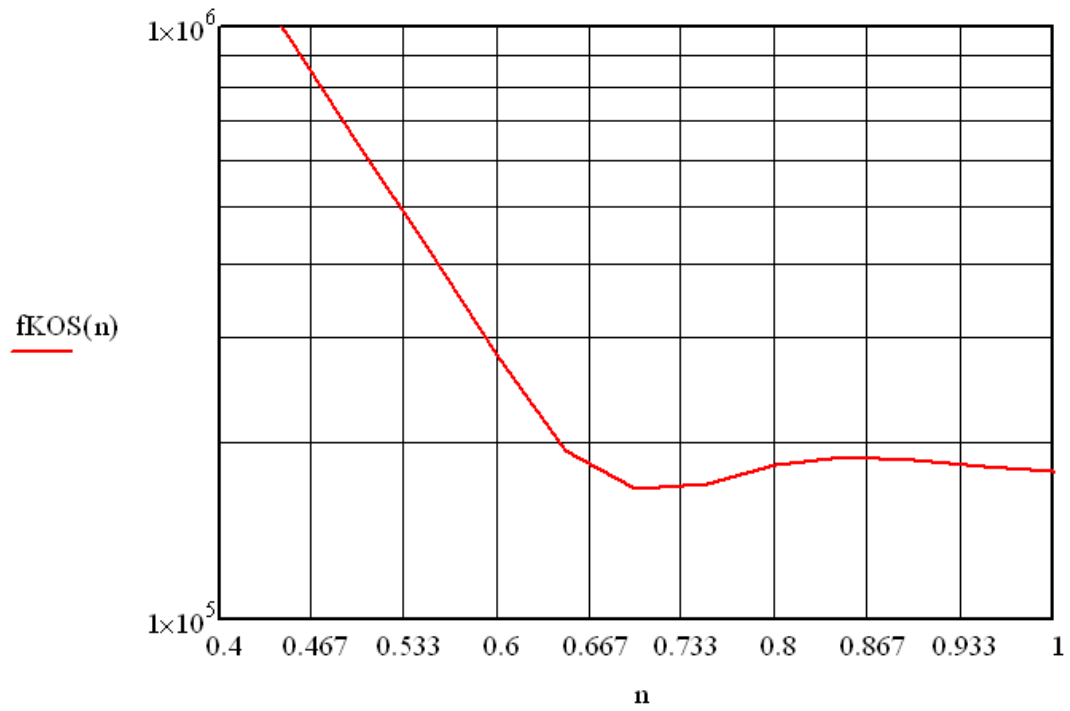
$$K0S4(n) := \sqrt{|K0(n,2)^2 - K0(n,4)^2|}$$

$$K0S5(n) := \sqrt{|K0(n,1)^2 - K0(n,4)^2|}$$

$$K0S6(n) := \sqrt{|K0(n,3)^2 - K0(n,4)^2|}$$

$$K0S7(n) := \sqrt{|K0(n,3)^2 - K0(n,4)^2|}$$

$$fKOS(n) := K0S1(n)^2 + K0S2(n)^2 + K0S3(n)^2 + K0S4(n)^2 + K0S5(n)^2 + K0S6(n)^2$$



Given

$$n := 0.5 \quad 0.4 < n < 0.9$$

$$P := \text{Minimize}(fKOS, n)$$

$$\underline{n} := P \quad i := 1 \dots \text{Dosl}$$

$$\underline{K0}(n, i) := \text{root}\left(fV(K, n, i) - V_{\text{exper}_1}, K\right)$$

$$KOST := \frac{1}{\text{Dosl}} \cdot \sum_{i=1}^{\text{Dosl}} K0(n, i)$$

Визначені коефіцієнт консистентності та показник степеня
неньютонівської поведінки

$$KOST = 471.909$$

$$\text{Па} \cdot \text{с}^n$$

$$n = 0.728$$

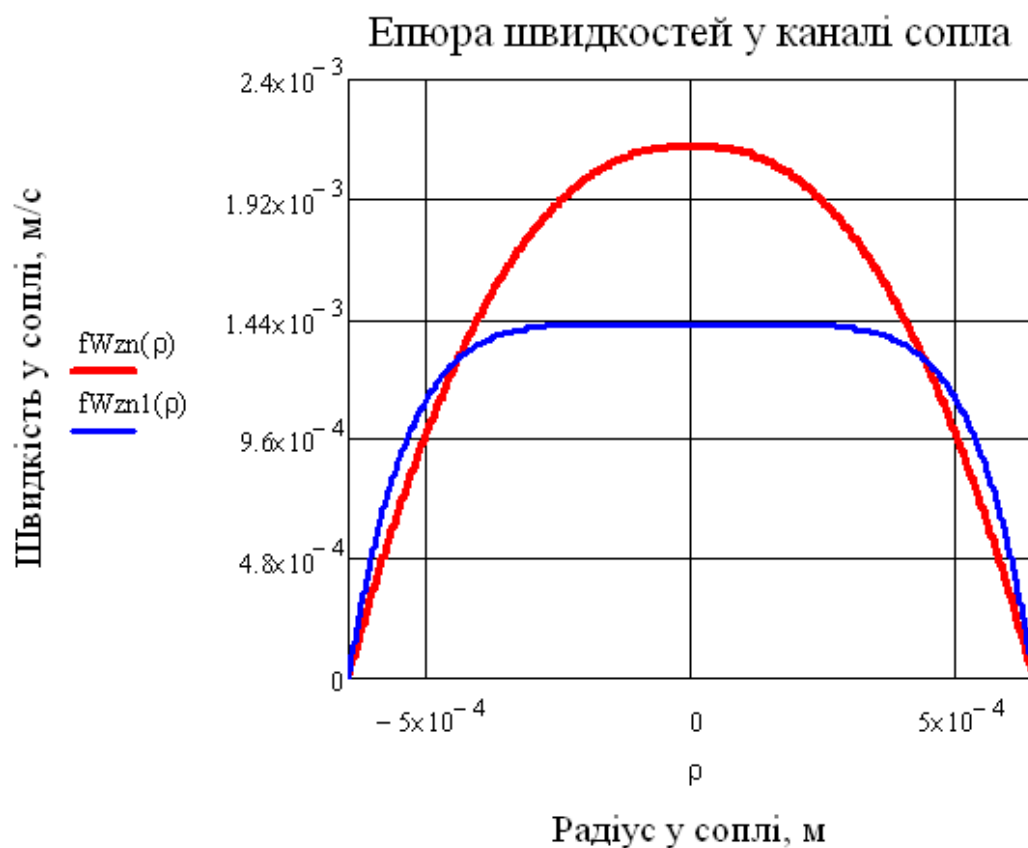
$$fWzn(\rho) := \begin{cases} fWz(\rho, KOST, n, 1) & \text{if } \rho > 0 \\ fWz(-\rho, KOST, n, 1) & \text{otherwise} \end{cases}$$

епюра швидкостей у каналі сопла за
визначеними реологічними
параметрами

$$KOST02 := K0(0.2, 1)$$

$$fWzn1(\rho) := \begin{cases} fWz(\rho, KOST02, 0.2, 1) & \text{if } \rho > 0 \\ fWz(-\rho, KOST02, 0.2, 1) & \text{otherwise} \end{cases}$$

епюра швидкостей у каналі сопла за
умови $n=0.2$ та об'ємній витраті що
відповідає експериментальній



Додаток В
Розрахунок похибок експериментальних даних

В.1 Розрахунок похибки прямого вимірювання маси розплаву

Досліджувана випадкова величина x вимірюється n разів в однакових умовах з однаковою точністю. У відповідності із теорією похибок найбільш близьким до істинного значення x_0 вимірюваної величини x є середньоарифметичне значення \bar{x} .

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{B.1})$$

Як було показано раніше, чим більше число вимірювань, тим ближче середнє значення наближається до істинного. Результати окремих вимірювань в загальному випадку відрізняються від істинного значення. Абсолютні похибки i -того вимірювання

$$\Delta x_i = x_0 - x_i. \quad (\text{B.2})$$

Середня арифметична похибка визначається згідно із співвідношенням:

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta x_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\bar{x} - x_i|. \quad (\text{B.3})$$

Вона визначає межі в яких лежить більше половини вимірювань (в теорії похибок доведено, що це число рівне 57% від всіх вимірювань). Отже значення x_0 з 57% ймовірністю потрапляє в інтервал від $\bar{x} - \eta$ до $\bar{x} + \eta$. Тоді результати вимірювань величини x записуються у виді :

$$x_0 = \bar{x} \pm \eta. \quad (\text{B.4})$$

1. Обчислюється середньоарифметичне значення серії з n вимірювань:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (\text{B.5})$$

2. Знаходимо похибки окремих вимірювань $\Delta x = x_i - \bar{x}$.
3. Обчислюються квадрати похибок окремих вимірювань Δx^2 .
4. Якщо одне з вимірювань різко відрізняється за своїм значенням від решти вимірювань, то слід перевірити чи не є воно промахом.

5. Визначається середньоквадратична похибка середнього значення прямих вимірювань:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{B.6})$$

Таким чином, для скінченної вибірки дисперсію середнього значення (середньоквадратичним відхиленням середнього значення) розраховують за формулою:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{B.7})$$

6. Задаємо значення коефіцієнта надійності $\alpha = 0,95$. За допомогою відповідних таблиць для даного значення величини α і n визначають величину коефіцієнта Стюдента $t_{\alpha}(n)$. Згідно таблиці для $\alpha = 0,95$ і $n = 7$ величина коефіцієнта Стюдента $t_{\alpha}(n) = 2,45$ для 1-го експерименту та $\alpha = 0,95$ і $n = 6$ величина коефіцієнта Стюдента $t_{\alpha}(n) = 2,57$ для 2-го експерименту. Знаходять похибку вимірювань Δx , яка визначається межею довірчого інтервалу: $\Delta x = t_{\alpha}(n) \cdot S_{\bar{x}}$.

7. Якщо величина похибки вимірювань, визначена в п.6, виявиться порівнянною з величиною похибки приладу, то

$$\Delta x = \sqrt{(t_{\alpha} \cdot S_{\bar{x}})^2 + \left(\frac{t_{\alpha}(\infty)}{3} \cdot (\Delta x_{np})\right)^2} \quad (\text{B.8})$$

Для $\alpha=0,95$ $t_{\alpha}(\infty)=1,96$.

8. Обчислюється відносна похибка:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (\text{B.9})$$

9. Остаточний результат записується у вигляді:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x, \varepsilon (\%). \quad (\text{B.10})$$

Середньоарифметичне значення ваги розплаву, що видавлено з капіляру у серії з n вимірювань:

1 експеримент:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,257 \text{ г.}$$

2 експеримент:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,2505 \text{ г.}$$

Дисперсія середнього значення розраховують за формулою:

1-ий експеримент:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,00779.$$

2-гий експеримент:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,0371.$$

де n – кількість дослідів в кожному експерименті.

Похибку вимірювань:

1-ший експеримент:

$$\Delta x = t_{\alpha}(n) \cdot S_{\bar{x}} = 2,45 \cdot 0,00779 = 0,019.$$

2-гий експеримент:

$$\Delta x = t_{\alpha}(n) \cdot S_{\bar{x}} = 2,57 \cdot 0,0371 = 0,0955.$$

Відносна похибка:

1-ший експеримент: $\varepsilon = 7,425 \%$

2-гий експеримент: $\varepsilon = 38,12 \%$

Отримали похибки вимірювань $x=0,257 \pm 0,0019$, 7,425% для 1-шого експерименту та $x= 0,2504 \pm 0,0955$, 38,12% для 2-го експерименту.

В.2 Розрахунок похибки непрямого вимірювання

1. Для кожної серії вимірювань проводиться обробка. При цьому для всіх вимірюваних величин задають одне і те ж значення надійності.

2. Обчислюється середнє значення шуканої величини: $A = f(x, y, z, \dots)$.

3. Обчислюються часткові похідні:

$$\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z} \quad (\text{B.11})$$

4. Обчислюється похибка непрямих вимірювань:

$$\Delta A = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \cdot (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \cdot (\Delta y)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \cdot (\Delta z)^2} \quad (\text{B.12})$$

5. Остаточний результат записується у вигляді, %:

$$A = \bar{A} \pm \Delta A \quad \varepsilon, \quad (\text{B.13})$$

де $\varepsilon(\%) = \frac{\Delta A}{\bar{A}}$ – відносна похибка непрямих вимірювань.

Розрахунок похибки при визначенні об'ємної витрати згідно формули:

$$v = \frac{m}{1000 \cdot \rho \cdot \tau}, \quad (\text{B.14})$$

де m – маса видавленого розплаву, г;

τ – час замірювання, с;

ρ – густина, кг/м³.

При цьому густина розплаву каучуку ρ є константою для умов проведення вимірювань, маса видавленого розплаву m за час замірювання τ є змінними та визначалися прямими вимірюваннями.

1. Обчислюємо середнє значення об'ємної витрати, маси розплаву та часу:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i = \frac{1}{7} \cdot \sum_{i=1}^7 v_i = 150,860 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{с},$$

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 m_i = 0,257 \text{ г},$$

$$\bar{\tau} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 \tau_i = 291,714 \text{ с},$$

де $n = 7$ – кількість дослідів.

2. Знаходимо абсолютну похибку непрямих вимірювань:

$$\Delta \nu = \sqrt{\left(\frac{\partial \nu}{\partial \tau} \Delta \tau \right)^2 + \left(\frac{\partial \nu}{\partial m} \Delta m \right)^2}, \quad (\text{B.15})$$

де $\frac{\partial \nu}{\partial \tau}, \frac{\partial \nu}{\partial m}$ – часткові похідні функції $\nu(\rho, \tau, m)$ по змінних ρ, τ, m , відповідно, взяті

при середніх величинах змінних параметрів $\tau = \bar{\tau}, m = \bar{m}$. Тоді часткові похідні:

$$\frac{\partial \nu}{\partial \tau} = -\frac{\bar{m}}{1000 \cdot 780 \cdot \bar{\tau}^2}; \quad \frac{\partial \nu}{\partial m} = \frac{1}{1000 \cdot 780 \cdot \bar{\tau}}. \quad (\text{B.16})$$

Похибка непрямого вимірювання

$$\begin{aligned} \Delta \nu &= \sqrt{\left(-\frac{\bar{m}}{1000 \cdot 780 \cdot \bar{\tau}^2} \cdot \Delta \tau \right)^2 + \left(\frac{1}{1000 \cdot 780 \cdot \bar{\tau}} \cdot \Delta m \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(-\frac{0,257}{1000 \cdot 780 \cdot 34,873^2} \cdot 174,368 \right)^2 + \left(\frac{1}{1000 \cdot 780 \cdot 34,873} \cdot 0,019 \right)^2} = 15,895 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{с}. \end{aligned}$$

Похибка вимірювань беремо з прямих вимірювань кожного параметру:

$$\Delta m = 0,019 \text{ г}.$$

$$\Delta \tau = 34,873 \text{ с}.$$

Відносна похибка:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \nu}{\nu} \cdot 100\% = \frac{15,895 \cdot 10^{-11}}{150,860 \cdot 10^{-11}} \cdot 100\% = 10,536\%$$

Підставивши всі параметри в формулу (8) отримуємо величину відносної похибки $\varepsilon = 10,536 \%$.

Розрахунки похибок прямого та непрямого вимірювання в програмному забезпеченні Microsoft Excel наведено в додатку А.

Висновок: отримали значення відносної похибки при непрямому

вимірюванні об'ємної витрати розплаву полімеру при течії через капіляр $\varepsilon = 11,954 \%$, що в межах допустимих значень. Похибка непрямого вимірювання $v = \bar{v} \pm \Delta v = 150,86 \pm 15,895$ (10,536 %).

Додаток Г
Публікації

Копії опублікованих праць за результатами магістерської дисертації Статті:

// Международный научный журнал «Интернаука» // № 7 (47), 1 т., 2018

// Технические науки //

УДК 624.016

Гоцький Ярослав Григорович

студент

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гоцький Ярослав Григорьевич

студент

Национального технического университета Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Gotskiy Yaroslav

Student of the

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Двойнос Ярослав Григорович

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры

машин и аппаратов химических та нефтепереработных производств

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Двойнос Ярослав Григорьевич

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры

машин и аппаратов химических и нефтеперерабатывающих производств

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Dvoinos Yaroslav

Candidate of Technical Science, Senior Lecturer,

Senior Lecturer at the Department of Machinery and

Apparatus of Chemical and Petroleum Processing Industries

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ЗАХИСНІ ПОЛІЕТИЛЕНОВІ ТРУБИ ДЛЯ ОПТОВОЛОКОННИХ КАБЕЛІВ ЗВ'ЯЗКУ З ВНУТРІШНІМ АНТИФРИКЦІЙНИМ ШАРОМ

ЗАЩИТНЫЕ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫЕ ТРУБЫ ДЛЯ ОПТОВОЛОКОННЫХ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ С ВНУТРЕННИМ АНТИФРИКЦИОННЫМ ШАРОМ

PROTECTIVE POLYETHYLENE PIPES FOR FIBER CABLE CONNECTION WITH ANTI-FRICTION INNER LAYER

Анотація. Робота присвячена технології виготовлення захисних труб, що використовуються в якості механічного захисту оптоволоконних кабелів зв'язку від зовнішнього впливу. Присвячено увагу сучасним технологіям монтажу труб та кабелю в труби, історії розвитку технології в Україні та розвинутих країнах, нормативно-технічній документації.

Ключові слова: труба з поліетилену, кабельна каналізація, оптоволоконний кабель, антифрикційне покриття.

Аннотация. Работа посвящена технологии изготовления защитных труб, которые используются в качестве механической защиты оптоволоконных кабелей связи от внешнего воздействия. Уделено внимание современным технологиям монтажа труб и кабеля в трубы, истории развития технологии в Украине и развитых странах, нормативно-технической документации.

Ключевые слова: труба из полиэтилена, кабельная канализация, оптоволоконный кабель, антифрикционное покрытие.

Summary. The work is dedicated to the technology of manufacturing protective pipes, which are used as mechanical protection of fibre-optic cables from external influences. Attention is paid to the modern technology installation of pipes and cables in pipes, the history of technology in Ukraine and developed countries, normative and technical documentation.

Key words: polyethylene pipes, sewage, cable, fibre optic cable, antifriction coating.

В умовах швидкого розвитку інформаційних технологій важливим питанням є розширення інформаційних мереж шляхом прокладання нових ліній зв'язку для користувачів.

Одним з напрямків розвитку інформаційних технологій є зменшення вартості та енергозатрат прокладання, мінімізації кількості з'єднань телекомунікаційних оптоволоконних мереж [1].

Оптичні волокна широко застосовуються для передачі інформації, внаслідок переваг даного кабелю в порівнянні з металевими кабелями. Найбільшими перевагами оптичного волокна є висока швидкість передачі інформації, яка на порядок вища ніж у металевих кабелях. Також оптоволоконний кабель піддається меншому впливу електромагнітним та радіочастотним перешкодам.

Оптоволоконні кабелі зв'язку найчастіше прокладаються під землею для уникнення пошкоджень та руйнувань під час господарської діяльності людини, погодних явищ та інших зовнішніх чинників. При прокладці оптоволоконного кабелю в ґрунт, особливо на великих відстанях виникає необхідність додаткового захисту кабелю від вологи, гризунів тощо, для цього оптичний кабель розміщують в каналі, який найчастіше виготовляють з поліетилену. Завдяки застосуванню захисних поліетиленових труб забезпечується надійний захист кабелю від зовнішніх чинників.

Нормативно-технічна документація організації захисту кабелів зв'язку постійно вдосконалюється, що викликано появою нового обладнання та технологій. Станом на сьогодні в Україні прийнято ДСТУ EN61386-24:2015, цей стандарт встановлює вимоги до виконання та випробування трубних систем, які прокладаються в землі, включаючи труби та трубну арматуру, для захисту та прокладання ізольованих

проводів та/або кабелів в електричних установках або у системах зв'язку.

Провідний галузевий інститут України ПрАТ Діпрозв'язок розробив галузеві будівельні норми у сфері телекомунікацій: ГБН В.2.2-34620942-002:2015. Відповідно до норми «прокладання кабельного трубопроводу безтраншейним способом із застосуванням кабелеукладачів дозволяється для ґрунтів 1-3 груп, водних перешкод і боліт».

Основні вимоги до захисної поліетиленової труби (далі ЗПТ) є: розміри труби та механічні параметри. Номінальний розмір ЗПТ відповідає зовнішньому діаметру труби. Основні механічні параметри є: стійкість до стискання, збереження круглої форми при навантаженні ґрунтом; спротив удару, визначає можливість безтраншейної укладки під час якої на трубу діють ударні навантаження [1].

Найсучаснішим способом прокладки оптоволоконних мереж зв'язку є пневматична укладка в попередньо розміщену захисну трубу в траншеї або з використанням укладальних кабелів-ножів — на вході до захисної труби встановлюється пристрій, який заштовхує кабель всередину труби механічно, та пневматично (на кінці закріплено герметизуючий пристрій, — «парашут») [1], схему якого наведено на рис. 1.

У підготовлені траншеї кабелі прокладаються як методом задувки, так і затикуванням ручним способом. Відповідно до ГБН В.2.2-34620942-002:2015 прокладання захисної поліетиленової трубки діаметром від 8 до 50 мм з наступною задувкою в неї кабелю діаметром від 3 до 12 мм. Задування кабелів або пневмопрокладка в раніше прокладену ЗПТ високої щільності — це метод, який дозволяє прокладати кабель у трубу, використовуючи силу стисненого повітря. Задувати можна не тільки оптичні, але і металеві кабелі та мікротрубки.

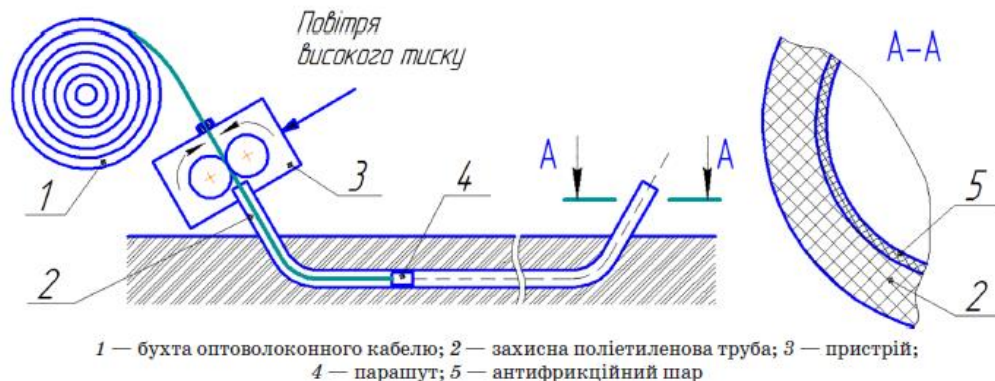


Рис. 1. Принципова схема прокладки оптоволоконного кабелю методом пневматичної укладки [1]

Основними вимогами до проведення процесу пневмопрокладки є: для задувки необхідно застосовувати труби з внутрішнім покриттям або з насичкою внутрішньої поверхні; коефіцієнт тертя внутрішньої поверхні повинен бути менше ніж 0,1; діаметр кабелю, що вводиться, повинен бути приблизно в 2 рази менше від внутрішнього діаметра труби. Також для задувки в поліетиленові труби рекомендовано застосовувати оптичні кабелі полегшеної конструкції (неброньовані кабелі).

Особливість ЗПТ у великій довжині труби в бухті, рис. 1, що пов'язано з необхідністю мінімізувати стики кабелю зв'язку. Станом на березень 2018 р. ЗПТ з внутрішнім антифрикційним шаром на Україні не виготовляється, а використовується ребриста внутрішня поверхня труби, рис. 3 або змащену мінеральним мастилом внутрішню стінку труби. Мастило (лубрікант) використовується для пневмопрокладки кабелю (задувки) в ЗПТ. Витрата мастила — 0,4÷0,5 л/км, найбільш поширені в Україні Plumettaz CJL 1032 (Швейцарія), Prelube-5000 (США).

Відповідно до вимог нормативно-технічної документації та будівельних норм виробники ЗПТ затвердили технічні умови, та випускають відповідну продукцію, наприклад «Завод поліетиленових виробів ТОВ «Планета Пластик» [2] виробляє труби поліетиленові для захисту оптоволоконних кабелів зв'язку з поліетилену низького тиску високої щільності (ПНД), класу ПЕ 63, ПЕ 100, діаметром від 14 до 50 мм згідно ТУ У 25.2-32375670-01-2003. ООО «РТЗ» Рубіжанський Трубний Завод м. Рубіжне [3] відповідно до ТУ У В.2-7-25.2-32926466-007:2012 «Труби з поліетилену захисні для прокладання волоконно-оптичних кабелів зв'язку». Продукцію ТОВ «Планета Пластик» та ООО «РТЗ» наведено на рис. 2.

Технології затягування кабелю у ЗПТ після її укладки наступні:

- 1) «проштовхування» кабелю роликовим пристроєм;
- 2) «задування» тягової смужки з наступним затягування кабелю цією смужкою;
- 3) «задування» та «проштовхування» кабелю за допомогою пневматичною пристрою.

Основними технічними перевагами методу пневматичної прокладки є відсутність зосереджених тягнучих зусиль, що діють на оптоволоконний кабель в процесі його просування по каналу, зведення до мінімуму вимог до працюючих на стиск зміцнювальних покриттів окремих світловодів і їх збірок, економія дефіцитної площі кабельних каналів і можливість заміни розгалужувальних муфт на розгалужувальні муфти трубчатих каналів [4, 330].

Такий спосіб дозволяє уникнути значних механічних навантажень, що у свою чергу дозволяє використати економічний слабо армований кабель. Прикладом є кабелі марки O-CFP(SR)D-24E9/125 зовнішній діаметр якого 10,4 мм; динамічна сила натягування — 600 Н; вага — 113 кг/км; ціна 26,19 грн/м. п., та кабелі марки O-CFP(SR)D-24E9/125/Flex зовнішній діаметр якого 9,6 мм, динамічна сила натягування — $N_{\max}=300$ Н; вага — $M=96$ кг/км; ціна 24,60 грн/м.п. [5]. Оболонку кабелів та захисної труби виготовлено з поліетилену високої густини, динамічний коефіцієнт тертя відповідно $\mu=0,13$, що дозволяє прокласти кабель, без змащування і його пошкодження на максимальну довжину:

$$N = LMg\mu < N_{\max} \Rightarrow L < \frac{N_{\max}}{Mg\mu} = \frac{300}{96 \cdot 9,81 \cdot 0,13} = 2450 \text{ м.}$$

Максимальна довжина прокладки без додаткового змащування мастила (лубріканта) оптоволоконного кабелю марки O-CFP(SR)D-24E9/125/Flex згідно приблизних розрахунків становить приблизно 2450 м., внаслідок того, що довжина захисної труби у бухті може досягати 5000 м, тому для прокладки даного кабелю в поліетиленову захисну трубу, яку розміщену в ґрунті необхідно розділити бухту з використанням з'єднувальної муфти чи використати більш армований кабель.

Використання у конструкції захисної труби внутрішнього антифрикційного шару дозволяє зменшити динамічний коефіцієнт тертя до $\mu=0,06$, а довжину прокладки до 5,3 км [6].

Матеріалом для антифрикційного шару на внутрішній поверхні захисної труби є композиція



Рис. 2. ЗПТ 40/35, довжина труби в бухті 1750 метрів [2], з ребристою внутрішньою стінкою ООО «РТЗ» [3]

силікону і високомолекулярного поліетилену високої щільності.

Висновок. Застосування методів пневматичної укладки забезпечує швидку та автоматизовану прокладку оптоволоконних кабелів в ґрунт. Перешкодами для здійснення даного процесу є максимально можлива довжина протяжки кабелю без його розриву, яка характеризується максимальним зусиллям на кабель, його масою та коефіцієнтом тертя між поверхнею труби та кабелю. Для збільшення довжини протяжки кабелю в поліетиленову трубу необхідно зменшити

коефіцієнт тертя між кабелем та внутрішньою поверхнею ЗПТ, для цього пропонується застосування внутрішнього антифрикційного покриття.

Тому виготовлення обладнання для екструзії полімерної композиції антифрикційного шару труб для захисту оптоволоконного кабелю є актуальним, а дослідження процесу екструзійного перемішування даної композиції — важливим. Базовим параметром якості антифрикційного шару приймається динамічний коефіцієнт тертя, значення якого має бути в межах 0,1÷0,075.

Література

1. Гоцький Я. Г. Захисні поліетиленові труби для оптоволоконних кабелів зв'язку з антифрикційним внутрішнім шаром / Гоцький Я. Г., Двойнос Я. Г. // Збірник праць VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні енерготехнології» ОНАХТ, 2017 — с. 157–161.
2. <http://www.planetaplast.com/kontakti/> (дата звернення: 22.05.2017)
3. <http://www.rtz.com.ua/gallery.html> (дата звернення: 22.05.2017)
4. Семенов А. Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС / Семенов А. Б. — М.: Академия АйТи; ДМК Пресс, 2006. — 632 с., ил.
5. <http://asp24.com.ua/made-in-ukraine/otl-m-2-7-p-8x12e1-96-volonkon/> (дата звернення: 17.10.2016).
6. Двойнос Я. Г., Гоцький Я. Г. Захисні поліетиленові труби для оптоволоконних кабелів зв'язку // Збірник тез доповідей XI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання» (06–07 грудня 2016 р. м. Київ), С. 40–41.

УДК 532.135

Гоцький Ярослав Григорович

студент

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гоцкий Ярослав Григорьевич

студент

Национального технического университета Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Gotskiy Yaroslav

Student of the

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Двойнос Ярослав Григорович

кандидат технічних наук, старший викладач,

старший викладач кафедри машин і апаратів хімічних

та нафтопереробних виробництв

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Двойнос Ярослав Григорьевич

кандидат технических наук, старший преподаватель,

старший преподаватель кафедры машин и аппаратов химических

и нефтеперерабатывающих производств

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Dvoinos Yaroslav

Candidate of Technical Science, Senior Lecturer,

Senior Lecturer at the Department of Machinery and

Apparatus of Chemical and Petroleum Processing Industries

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ РОЗПЛАВУ КОМПОЗИЦІЇ ПОЛІЕТИЛЕН – КАУЧУК

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОМОГЕНИЗАЦИИ РАСПЛАВА КОМПОЗИЦИИ ПОЛИЭТИЛЕН – КАУЧУК

MATHEMATICAL MODELING PROCESS OF HOMOGENIZATION MELT COMPOSITION POLYETHYLENE – RUBBER

Анотація. Робота присвячена моделюванню процесу змішування та диспергування силіконового каучуку з розплавом поліетилену у змішувальному елементі одночерв'ячного екструдера. Приділено увагу технологічності змішувального елементу, формулювання фізичної моделі процесу, що дозволяє наблизити розрахунки до реальної конструкторської розробки. Проведено аналіз відомих гідродинамічних моделей та методів визначення якості змішування.

Відповідно до технології переробки композиції обґрунтовано вимоги до якості змішування та температури розплаву, що дозволило сформулювати критерій якості процесу та мету моделювання: встановлення залежностей якості процесу змішування від основних геометричних параметрів інструменту.

В результаті математичного моделювання отримано емпіричні залежності, які можуть бути використані при проектуванні екструзійного обладнання.

Робота в першу чергу зацікавить інженерів-конструкторів екструзійного та нестандартного обладнання для переробки полімерних матеріалів.

Ключові слова: каучук з силікону, індекс перемішування, розплав поліетилену, екструдер, черв'як екструдера.

Аннотация. Работа посвящена моделированию процесса смешивания и диспергирования силиконового каучука с расплавом полиэтилена в смешительном элементе одночервячного экструдера. Уделено внимание технологичности смешительного элемента, формулировка физической модели процесса, что позволяет приблизить расчеты к реальной конструкторской разработки. Проведен анализ известных гидродинамических моделей и методов определения качества смешивания.

Согласно технологии переработки композиции обоснованно требования к качеству смешивания и температуры расплава, что позволило сформулировать критерий качества процесса и цели моделирования: установление зависимости качества процесса смешивания от основных геометрических параметров инструмента.

В результате математического моделирования получены эмпирические зависимости, которые могут быть использованы при проектировании экструзионного оборудования.

Работа в первую очередь заинтересует инженеров-конструкторов экструзионного и нестандартного оборудования для переработки полимерных материалов.

Ключевые слова: каучук из силикона, индекс перемешивания, расплав полиэтилену, экструдер, червяк экструдера.

Summary. The work is devoted to modeling the process of mixing and dispersing silicone rubber with the melt polyethylene in the mixing element of a single screw extruder. Attention is paid to the technological of the mixing element and integration methods of forming geometrical conditions to the physical model, allowing calculations to approximate the real design project. The analysis of known hydrodynamic models and methods for determining the quality of mixing.

According to the technology of processing compositions justified demands for quality mixing and temperature of the melt, which allowed formulating quality criteria and objective process modeling: establishing dependences of the quality of the mixing process from the main geometric parameters of the tool.

As a result of mathematical modeling obtained empirical dependencies which can be used in the design of extrusion equipment. Working primarily interested in design engineers and non-standard extrusion equipment processing of polymeric materials.

Key words: rubber silicone, mixing index, melt plastic, extruder, extruder screw.

Переробка та створення нових композицій на основі полімерів є актуальною, оскільки ці матеріали отримують кращі експлуатаційні характеристики, а саме, при незначному додаванні каучуку до полімеру покращуються механічні характеристики отриманої композиції, такі як еластичність, міцність до удару та морозостійкість. Світова компанія DuPont використовує концентрати з первинними амідами жирних кислот на основі рослинної сировини для отримання композиції з низьким коефіцієнтом тертя.

Каучук з силікону марки СКТН [1] Запорізького державного підприємства «Кремнійполімер» разом з МФСН-В (затверджувач і стабілізатор) та поліетиленом утворюють композицію з антифрикційними властивостями, які дозволяють використати новий матеріал як антифрикційне покриття внутрішньої поверхні захисних труб з поліетилену для монтажу оптоволоконних кабелів зв'язку. Перевага силіконових добавок у стабільності властивостей, — полімеризований високомолекулярний силіконовий каучук не розчиняється у поліетилені, і відповідно, не мігрує в середину стінки труби. Крім того, температура менше впливає на коефіцієнт тертя. Традиційно, технологія екструзії таких композицій передбачає створення гранульованого концентрату, який у екструдері внутрішнього шару перемішується з основним матеріалом.

Композиція поліетилену, каучуку та інших наповнювачів є неоднорідною і всі компоненти є нерозчинними один в одному, тому процес змішування та диспергування компонентів суміші є важливим, а розробка нової математичної моделі для проведення чисельних експериментів з різними конструкціями змішувальних елементів та технологічних параметрів екструзії є важливим та актуальним.

Змішувальні можливості більшості конструкцій черв'яків є обмеженими, і для інтенсифікації процесів змішування та диспергування застосовують різноманітні конструкції змішувальних елементів [2, с. 65].

Найбільш відомими конструкціями змішувальних елементів є конструкція Меддока (Union Carbide), Дрея, CRD змішувач та багатьох інших [3, с. 489].

Конструкцію спірального змішувального елемента Меддока наведено на рисунку рис. 1, 2.

Перевагою спіральної форми елемента Меддока є більша довжина зазору, через який має переміститися полімерна композиція, що забезпечує зменшення тиску у напірних каналах черв'яка (позиція 1, рис. 2).

Принцип роботи змішувального елемента складається з таких стадій. У каналі черв'яка утворюється тиск, який є рушійною силою процесу течії у каналах змішувального елемента, розплав потрапляє до впускного каналу змішувального елемента, розплав

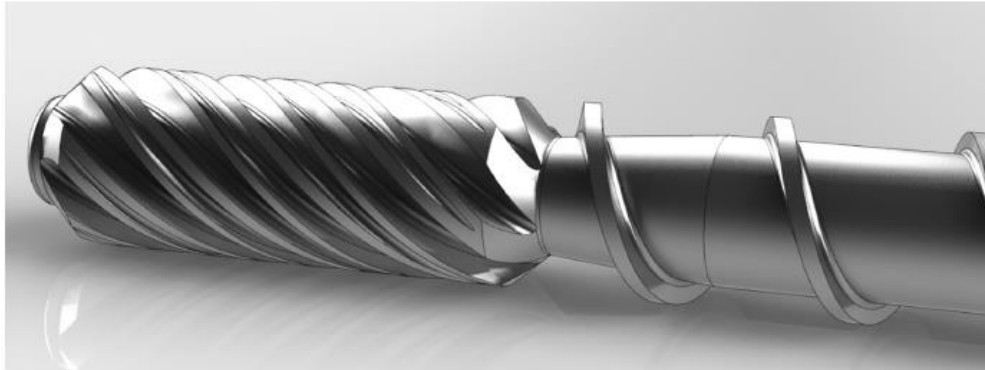


Рис. 1. Спиральний змішувальний елемент Меддока
Джерело: складено автором на основі [3, с. 490]

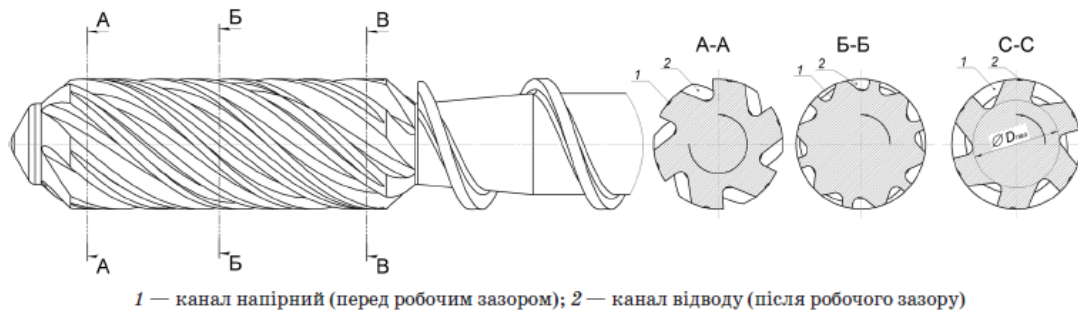


Рис. 2. Креслення спірального змішувального елемента Меддока
Джерело: складено автором на основі [3, с. 490]

витісняється з зазору між циліндром та зовнішнім діаметром змішувального елемента під дією тиску. Змішувальний елемент рухається зі швидкістю обертання черв'яка.

Профіль швидкостей в зазорі, буде відмінним від початкового профілю в впускному каналі. Згідно принципу роботи та уявлень про даний процес зазор між корпусом та виступом змішуючого елемента є робочим зазором змішувального елемента. Слід також зазначити, що чим складніше профіль швидкостей в робочих каналах та зазорах змішувального елемента тим вищою буде якість змішування [4, с. 120].

Окрім перемішування розплавів полімерів відбувається подрібнення їх локальних концентраційних неоднорідностей (локалізацій). Даний процес називається диспергуючим змішуванням.

При процесі диспергуючого змішування необхідною умовою подрібнення є величина напружень зсуву в розплаві порівняно до значення величини руйнування локалізацій, яка є різною для кожної речовини. Якщо напруження зсуву будуть менші від значення величини руйнування локалізацій, то розділення та подрібнення агломератів не відбудеться.

За основу математичного моделі процесу змішування та диспергування було обрано математичну

модель модуля гомогенізації. Дослідженню процесу гомогенізації присвячено багато теоретичних і експериментальних робіт, оскільки даний процес найбільше впливає на якість отриманого розплаву композиції [4, с. 93].

Процес змішування неоднорідних розплавів полімерів досить складний, і важко описується математичними методами внаслідок багатовимірності процесу. Це обумовлено тим, що геометрія більшості змішувальних елементів досить складна. Також труднощі виникають з моделюванням середовища, яке змішується внаслідок неоднорідності компонентів розплаву, які є нерозчинними один в одному.

При змішуванні неоднорідних високов'язких сумішей, якими являються розплави полімерів основним механізмом змішування є переміщення компонентів матеріалу в робочих органах змішувального елемента. Таке переміщення у процесі змішування компонентів у розплаві полімерів здійснюється внаслідок молекулярної дифузії, конвекції та турбулентної дифузії. Висока в'язкість розплавів термопластів дозволяє використати ламінарну модель течії розплаву полімеру в каналах та зазорах змішувального елемента. Внаслідок високої молекулярної маси більшості полімерів молекулярна дифузія в їх розплавах

повільна, тому нею в моделюванні процесу можна знехтувати. Отже вирішальне значення має змішування в випадку ламінарної течії, яку ще називають ламінарним або зсувним змішуванням [4, с. 119].

Моделювання проводилось для зони гомогенізації розплаву композиції полімеру в одночерв'ячних екструдерах. В даній зоні завантажений матеріал є повністю розплавленим, і змішування взаємно нерозчинних рідин з різними в'язкостями характеризується накопиченою деформацією зсуву, яка виникає в розплаві при його русі і робочих елементах.

Аналіз існуючих методів моделювання процесів в робочих зазорах змішувачів, встановлених на черв'як екструдера дозволив сформулювати задачі моделювання:

1. Розробка математичної моделі для визначення епюр швидкостей розплаву полімеру в робочих зазорах;

2. Розробка математичної моделі для визначення енергії дисипації та значення перегріву розплаву. енергії дисипації та значення перегріву розплаву.

Для моделювання процесів у робочих зазорах змішувача Меддока проведено аналіз літературних джерел та зроблено наступні спрощення та припущення [4, с. 119]:

- модель спірального елемента спрощено до елемента з змінною глибиною впускних та випускних каналів і у якого довжини зазорів однакові, рис. 3;
- стаціонарність процесу течії розплаву;
- змішування досягається фізичним переміщенням компонентів у рідині;
- молекулярна дифузія в розплаві дуже повільна, тому її при дослідженні процесу змішування та диспергування компонентів суміші не враховують;

- ламінарний режим течії розплаву в кільцевому перетині одночерв'ячного екструдера внаслідок високої в'язкості розплаву;
- низька теплопровідність полімеру призводить до реологічної неоднорідності (різної в'язкості розплаву в об'ємі полімеру);
- середовище є суцільним, в ньому відсутні порожнини;
- відсутнє проковзування розплаву на стінках робочих органів.

На рис. 4 зображено фізичну модель процесу змішування розплаву полімеру у в робочих каналах змішувального елемента екструдера типу Меддока.

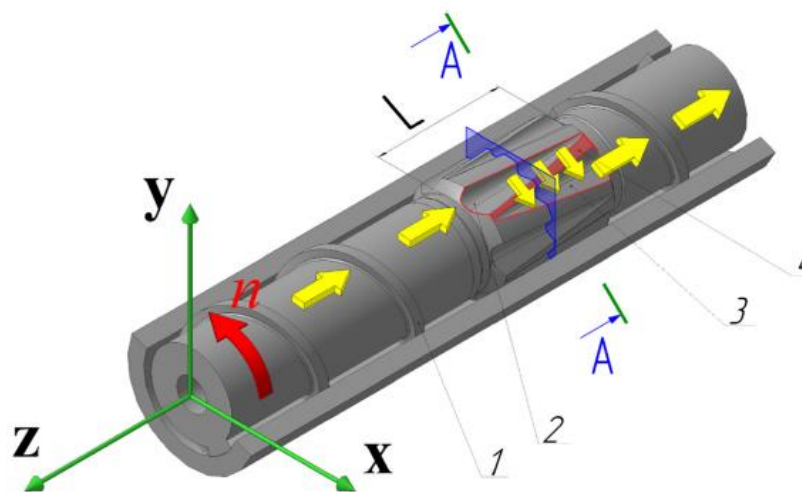
Для математичної моделі процесу обираємо плоскопаралельну модель. Елементарний об'єм рідини в впускному каналі та змішувальному елементі $\partial x, \partial y, \partial z$ знаходиться в рівновазі під дією сил, викликаних градієнтом тиску у зазорі $\partial P / \partial z, \partial P / \partial x$ по осі z та x , та сил, викликаних силами в'язкого тертя при його течії у зазорі.

Внаслідок дії градієнту тиску на елементарний об'єм виникають відповідні сили опору, які в даній схемі виражені через напруження зсуву в матеріалі τ_{yx} . Рівняння збереження кількості руху для обраної моделі та з врахуванням припущень:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0. \quad (1)$$

В'язкість розплаву експериментально, методом капілярної віскозиметрії було визначено за степеним законом Освальда — де Валя [3, с. 179]:

$$\mu_{ef} = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} = 2695 \cdot \dot{\gamma}^{1,8-1}, \quad (2)$$



1 — гвинтова лінія; 2 — впускний канал; 3 — випускний канал; 4 — робочий зазор

Рис. 3. Схема течії розплаву полімеру в каналі зони гомогенізації екструдера

Джерело: розроблено автором

де n — показник степені неїтунівської поведінки (індекс значення);

$\dot{\gamma}$ — швидкість зсуву, c^{-1} ;

K — коефіцієнт консистентності, $(\text{Па}\cdot\text{с})n$;

Компонент тензора напружень зсуву дорівнює:

$$\partial\tau_{yx} = \mu_{ef} \cdot \frac{\partial W_x}{\partial y}, \quad (3)$$

де μ_{ef} — в'язкість ньютонівської рідини; W_x — швидкість потоку по осі x , м/с; τ_{yx} — напруження зсуву, Па.

Підставивши значення компонентів тензора напружень до рівняння (1) та зробивши спрощення, щодо одновимірного руху розплаву полімеру отримуємо рівняння збереження кількості руху в робочому зазорі змішувального елемента:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu_{ef} \cdot \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2}. \quad (4)$$

Розв'яжемо рівняння (4) через складову швидкості W_x , для цього двічі проінтегруємо рівняння, отримуємо:

$$W_x = \frac{1}{\mu_{ef}} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{y^2}{2} + C_1 \cdot y + C_2. \quad (5)$$

Граничні умови для знаходження сталих інтегрування C_1 та C_2 :

$$\begin{cases} W_x(y=0) = 0; \\ W_x(y=h) = \frac{\pi D n}{60}. \end{cases} \quad (6)$$

З використанням граничних умов знаходимо сталі інтегрування:

$$C_1 = \frac{\pi D n}{60} \cdot \frac{1}{h} - \frac{1}{2\mu_{ef}} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \cdot h; C_2 = 0. \quad (7)$$

Підставляємо отримані значення сталих інтегрування та зробивши відповідні спрощення отримуємо наступне:

$$W_x = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \cdot \frac{y}{h} - \frac{1}{2\mu_{ef}} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \cdot (h \cdot y - y^2), \quad (8)$$

де h — глибина зазору між корпусом та змішувальною секцією, м;

D — внутрішній діаметр корпусу, м;

n — швидкість обертання рухомого циліндру, об/хв;

$\partial P / \partial x$ — градієнт тиску, Па/м.

Швидкість зсуву в робочому зазорі змішувального елемента:

$$\dot{\gamma}_{yx} \approx \frac{\Delta W_x}{h}. \quad (9)$$

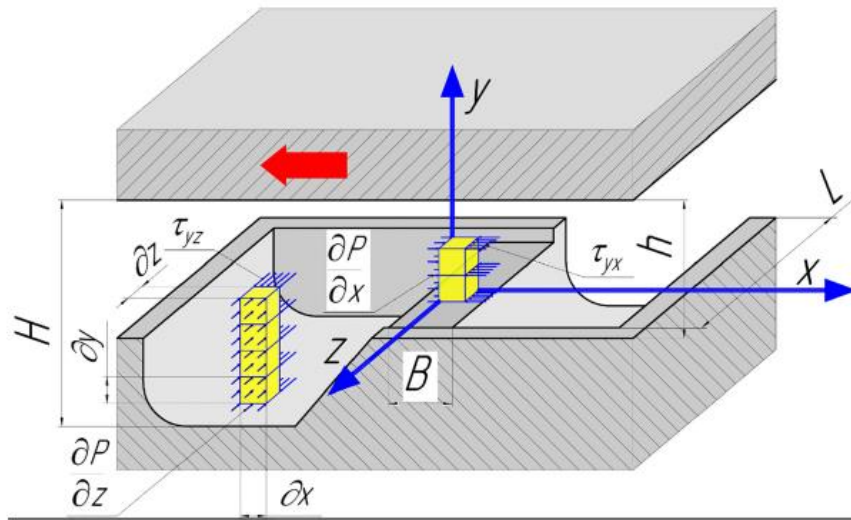
Градієнт тиску знаходимо з рівняння нерозривності:

$$G = \rho \cdot B \cdot h \cdot \frac{1}{h} \int_0^h W_x dy, \quad (10)$$

де ρ — густина розплаву, кг/м^3 ;

B — ширина зазору, м;

G — масова продуктивність екструдера, кг/с .



H — глибина каналу; h — глибина зазору між корпусом та змішувальною секцією; B — ширина робочого зазору; L — довжина каналу; $\partial x, \partial y, \partial z$ — розміри елементарного об'єму; $\partial P / \partial x$ — градієнт тиску в поперечному напрямі; $\partial P / \partial z$ — градієнт тиску в поздовжньому напрямі

Рис. 4. Фізична модель процесу змішування полімеру в змішувальній секції екструдера
Джерело: розроблено автором

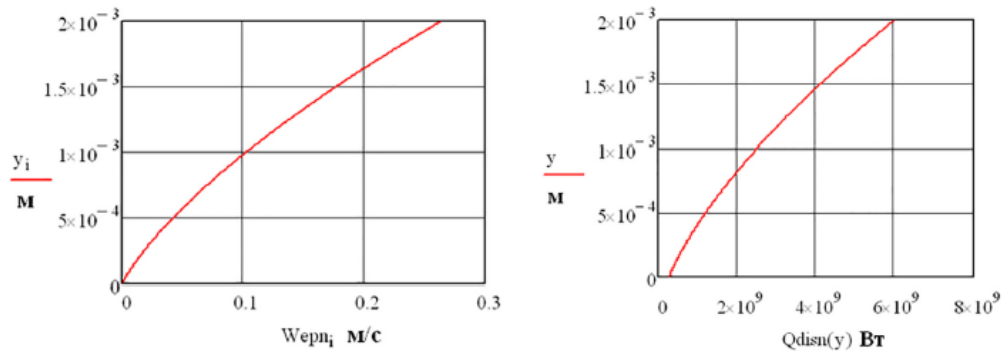


Рис. 5. Епіюра швидкості у робочому зазорі змішувального елементу та потужності дисипації
Джерело: розроблено автором

Після підстановки до виразу (10) значення швидкості W_x , інтегрування та вираження значення градієнту тиску отримуємо:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = 12 \cdot \mu_{ef} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D \cdot n}{120 \cdot h^2} - \frac{G}{\rho \cdot B \cdot h^3} \right). \quad (11)$$

Критерієм якості змішування є величина накопиченої деформації зсуву:

$$\gamma = \int \dot{\gamma} dt = \dot{\gamma} \cdot t. \quad (12)$$

Середній час перебування частинок розплаву, с:

$$t = \frac{V}{Q}, \quad (13)$$

де V — об'єм апарату, m^3 ; Q — витрати, m^3/s .

Напруження, що виникають в розплаві, Па:

$$\tau = K \cdot |\dot{\gamma}_{yx}|^{n-1} \cdot \dot{\gamma}_{yx}. \quad (14)$$

Потужність дисипації в об'ємі елементу Вт:

$$\Delta Q_{\partial} = B \cdot L \int_0^h \mu_{ef} \left(\frac{\partial W_x}{\partial y} \right)^2 dy. \quad (15)$$

Перегрів розплаву $^{\circ}C$:

$$\Delta T = \frac{\Delta Q_{\partial}}{G \cdot C_p} - T_0, \quad (16)$$

де C_p — питома теплоємність розплаву, Дж/(кг·с);

G — масова продуктивність, кг/с;

T_0 — температура перед входом в змішувальний елемент, $^{\circ}C$.

Локальне рішення (чисельний експеримент) математичної моделі чисельними методами було проведено з використанням програмного середовища MathCAD, результати наведено на рис. 5: профіль швидкості в робочому зазорі.

Вхідні параметри чисельного експерименту:

глибина зазору $h = 0,002$ м; діаметр циліндру $D = 0,063$ м; швидкість обертання черв'яка $n = 80$ об/хв; масова продуктивність розплаву $G = 80$ кг/год; ширина зазору $B = 0,005$ м; довжина зазору $L = 0,12$ м; кількість каналів 6 шт; кількість зазорів $n_z = 6$ шт.

Реологічні параметри:

коефіцієнт консистентності $K = 2,695 \cdot 10^3$ (Па·с) n ; показник степені $n = 1,8$; теплоємність розплаву $C_p = 2720$ Дж/(кг·с); густина розплаву $\rho = 780$ кг/ m^3 ; температура перед входом $T_0 = 200$ $^{\circ}C$.

Висновок. Геометричні умови течії композиції розплаву у робочому зазорі змішувального елементу викликають нелінійну залежність швидкості потоку від висоти зазору. Ефективність роботи змішувального елементу Меддока напряму залежить від напірної характеристики екструдеру та швидкості обертання черв'яка, однак має межу, обумовлену перегрівом розплаву та початком механодеструкції $\dot{\gamma} \geq 1000$ s^{-1} (температура композиції на вході в зазор 200 $^{\circ}C$, після зазору 270 $^{\circ}C$). Під час чисельного розрахунку в програмі MathCAD отримали наступні дані: температура розплаву після змішувального елементу 324 $^{\circ}C$; величина накопиченої деформації зсуву $\gamma = 6,7$; час перебування розплаву у робочому зазорі $t = 0,126$ с.

Література

1. <http://silic.com.ua/index.php?Lev=silicone-rubbers> (дата звернення: 17.05.2017).
2. Ким В. С., Скачков В. В. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс. — М.: Химия, 1988. — 240 с., ил.
3. Раувендааль К. Экструзия полимеров / Пер. с англ. под ред. А. Я. Малкина — СПб.: Профессия, 2008. — 768 стр., ил.
4. Радченко Л. Б. Сівецький В. І. Основи моделювання і конструювання черв'ячних екструдерів: Навч. посіб. — К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2002. — 152 с.

УДК 624.016

**ЗАХИСНІ ПОЛІЕТИЛЕНОВІ ТРУБИ ДЛЯ ОПТОВОЛОКОННИХ
КАБЕЛІВ ЗВ'ЯЗКУ З АНТИФРИКЦІЙНИМ ВНУТРІШНІМ ШАРОМ
PROTECTIVE POLYETHYLENE PIPES FOR FIBER
CABLE CONNECTION WITH ANTI-FRICTION INNER LAYER**

**магістрант Гоцький Я. Г., к.т.н, ст. викл. Двойнос Я. Г., Національний
технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ**

**undergraduate Hotskij Y.G., Ph.D., senior lecturer Dvoinos Y.G.,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv**

Анотація. Робота присвячена конструкції та технології виготовлення труб захисних, що використовуються в якості механічного захисту оптоволоконних кабелів зв'язку від зовнішнього впливу, а також в якості каналу для прокладання оптичного кабелю зв'язку. Прیدілено увагу сучасним технологіям монтажу труб та кабелю в труби, історії розвитку технології в Україні та розвинутих країнах, нормативно-технічній документації.

Пропонується аналіз технічних рішень та технологій їх реалізації. Використана спрощена методика розрахунку розривних сил в кабелі під час його монтажу.

Сформульовано додаткові вимоги до труб захисних, що використовуються в якості механічного захисту оптоволоконних кабелів зв'язку. Зроблено висновки про склад лінії для виробництва таких труб.

Робота в першу чергу зацікавить інженерів-конструкторів нестандартного обладнання для переробки полімерних матеріалів, буде цікава проєктантам лінійних мереж зв'язку.

Abstract. The work is dedicated to the design and technology of protective tubes that are used as mechanical protection of fibre optic cables from external influence and as a channel for laying optic cables. Attention is paid to modern technology installation of pipes and cables in the tube, the history of technology in Ukraine and developed countries, regulatory and technical documentation.

An analysis of technical solutions and technology implementation, use simplified method of calculating the explosive force in the cable during its installation.

Formulated additional requirements for protective pipes used as mechanical protection of fibre optic cables. The conclusion about the composition of the line for the production of pipes.

Working primarily interested engineers - designers of standard equipment for the processing of polymeric materials will be interesting designer linear networks.

Ключові слова: труба з поліетилену, кабельна каналізація, оптоволоконний кабель, антифрикційне покриття.

Keywords: polyethylene pipes, sewage, cable, fibre optic cable, antifriction coating.

Одним з напрямків розвитку інформаційних технологій є зменшення вартості та енергозатрат прокладання, мінімізації кількості з'єднань телекомунікаційних оптоволоконних мереж.

Телекомунікаційний оптоволоконний кабель, найчастіше прокладається в канал (захисна труба з поліетилену), який закопано в ґрунт. Це забезпечує надійний захист кабелю від зовнішніх чинників, таких як несприятливі погодні явища, господарська діяльність людини тощо.

Нормативно-технічна документація організації захисту кабелів зв'язку постійно вдосконалюється, що викликано появою нових конструкцій, та технологій.

Стандарт 2004 року ДСТУ EN 50086-2-4:2004 Системи кабелепроводів для електричних установок. Частина 2-4. Окремі вимоги до підземних систем кабелепроводів (EN50086-2-4:1994, IDT) було доповнено ДСТУ 4549-1:2006 Системи кабельних трубопроводів. Частина 1. Загальні вимоги та методи випробування. Відповідно до наказу від 29.12.2015 № 213 "Про прийняття нормативних документів України, гармонізованих з міжнародними та європейськими нормативними документами, національних стандартів України, скасування нормативних

документів України" прийнято ДСТУ EN 61386-24:2015 Системи кабелепроводів для електричних установок. Частина 24. Додаткові вимоги до підземних систем кабелепроводів (EN 61386-24:2010, IDT). Стандарт встановлює вимоги до виконання та випробування трубних систем, які прокладаються в землі, включаючи труби та трубу арматуру, для захисту та прокладання ізольованих проводів та/або кабелів в електричних установках або у системах зв'язку.

Відповідно до термінів ДСТУ 4549-1:2006 "Кабельний трубопровід – складова частина закритої системи електропроводки з кільцевим поперечним перерізом, призначена для розміщення ізольованих проводів і/або кабелів у електричних або телекомунікаційних установках, через яку їх протягують".

Провідний галузевий інститут України ПрАТ Діпрозв'язок розробив галузеві будівельні норми у сфері телекомунікацій: ГБН В.2.2-34620942-002:2015 «Лінійно-кабельні споруди телекомунікацій. Проектування». Відповідно до норми "прокладання кабельного трубопроводу безтраншейним способом із застосуванням кабелеукладачів дозволяється для ґрунтів 1–3 груп, водні перешкоди, болота".

Основні вимоги до захисної поліетиленової труби (далі ЗПТ): розміри труби, механічні параметри. Номінальний розмір ЗПТ відповідає зовнішньому розміру труби (від 8 мм до 50 мм), також регламентується внутрішній діаметр. Основні механічні параметри ЗПТ відповідають вимогам до експлуатації: стійкість до стискання (3 типи) забезпечує збереження круглої форми при навантаженні ґрунтом; спротив удару (2 групи) визначає можливість безтраншейної укладки, рисунок 1, під час якої на трубу діють ударні навантаження [1].

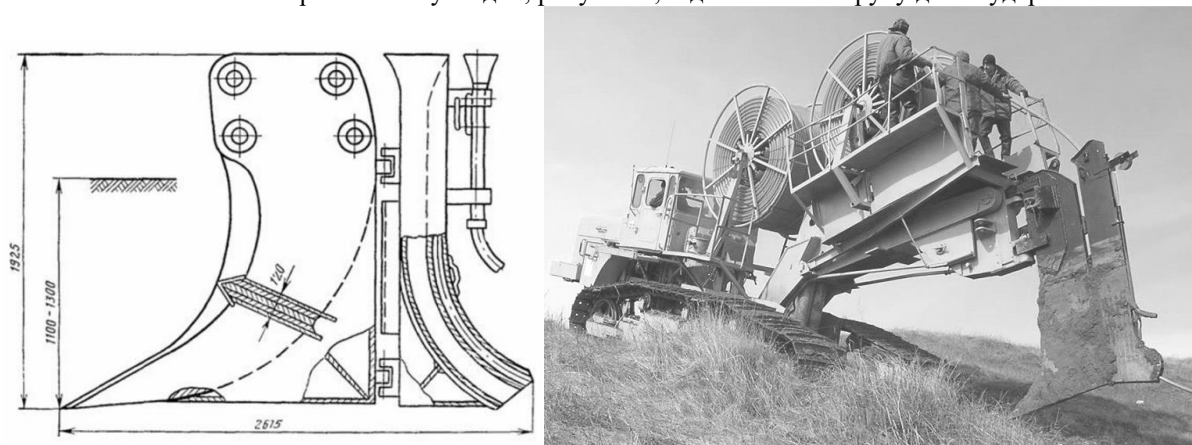


Рисунок 1 – Ніж кабель – укладальний типу НКП-1Д

У підготовлені канали кабелі прокладаються як методом задувки, так і методом затягування ручним способом. Відповідно до ГБН В.2.2-34620942-002:2015 прокладання захисної поліетиленової трубки діаметром від 8 мм до 50 мм з наступною задувкою в неї до 25 поліетиленових мікротрубок діаметром від 3 мм до 12 мм для прокладання мікрокабелів. Задування кабелів або пневмопрокладка в раніше прокладену захисну поліетиленову трубку високої щільності - це метод, який дозволяє прокласти кабель у трубку, використовуючи силу стисненого повітря. Задувати можна не тільки оптичні, але і металеві кабелі та мікротрубки. Для задувки використовуються труби з внутрішнім покриттям спеціальною плівкою або з насічкою внутрішньої поверхні. Коефіцієнт тертя внутрішньої поверхні повинен бути менше ніж 0,1. Діаметр кабелю, що вводиться, повинен бути приблизно в 2 рази менше від внутрішнього діаметра трубки (таблиця 11.3) Для задувки в поліетиленові трубки рекомендується застосовувати оптичні кабелі полегшеної конструкції (неброньовані кабелі) Зазначені співвідношення діаметрів трубки і кабелю наведено з урахуванням можливості введення кабелю методом задування від 500 м до 2000 м з однієї установки.

Оптичні кабелі, призначені для задувки в поліетиленові трубки, повинні мати такі параметри: - зовнішню оболонку з ПЕ середньої або високої щільності для забезпечення низького коефіцієнта тертя між кабелем і каналом; у разі застосування кабелів з оболонкою з іншого матеріалу, бажано, щоб цей коефіцієнт був не гіршим; - діаметр обраного кабелю не повинен бути більше ніж половина діаметра каналу (відповідно до таблиці 11.3); - маса оптичного кабелю повинна бути в межах від 0,1 кг/пог.м до 0,3 кг/пог.м; - жорсткість кабелю повинна бути низькою (в межах від $1\text{Н}\times\text{м}^2$ до $3\text{Н}\times\text{м}^2$); - допустиме розтягувальне зусилля повинне бути не менше ніж 1,0 кН.

Відповідно до вимог нормативно-технічної документації та будівельних норм виробники ЗПТ затвердили технічні умови, та випускають відповідну продукцію, наприклад "Завод поліетиленових виробів ТОВ "Планета Пластик" [1] виробляє труби поліетиленові для захисту оптоволоконних кабелів зв'язку з поліетилену низького тиску високої щільності (ПНД), класу ПЕ 63, ПЕ 100, діаметром від 14 до 50 мм згідно ТУ У 25.2-32375670-01-2003. ООО "РТЗ" Рубіжанський Трубний Завод м. Рубіжне [2] відповідно до ТУ У В.2.7-25.2-32926466-007:2012 "Труби з поліетилену захисні для прокладання волоконно-оптичних кабелів зв'язку".

Особливість ЗПТ у великій довжині труби в бухті, рисунок 2, що пов'язано з необхідністю мінімізувати стики

кабелю зв'язку. Станом на травень 2017 р ЗПТ з внутрішнім антифрикційним шаром на Україні не виготовляється, а використовується ребриста внутрішня поверхня труби, рисунок 3 або змащену мінеральним мастилом внутрішню стінку труби. Мастило (лубрікант) використовується для пневмопрокладки кабелю (задувки) в ЗПТ. Витрата мастила – $0,4 \pm 0,5$ л/км, найбільш поширені в Україні Plumettaz CJL 1032 (Швейцарія), Prelube-5000 (США).

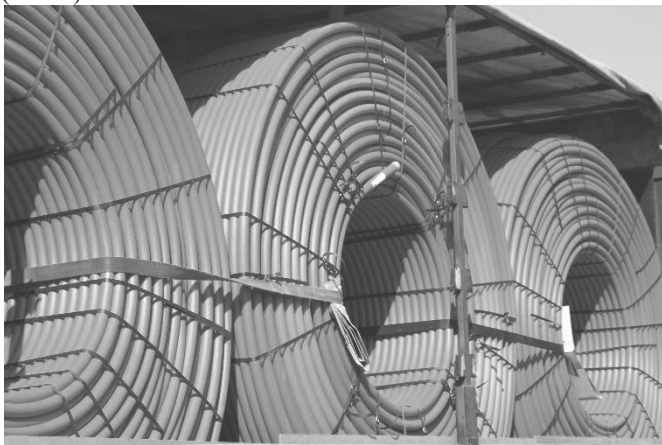


Рисунок 2 – ЗПТ 40/35, довжина труби в бухті 1750 метрів

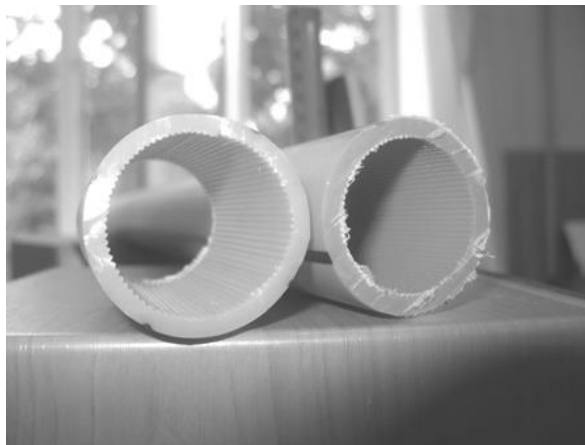


Рисунок 3 – ЗПТ 40/35 з ребристою внутрішньою стінкою ООО "РТЗ" [2]

Технології затягування кабелю у ЗПТ після її укладки наступні:

1. "заштовхування" кабелю роликовим пристроєм;
2. "задування" тягової смужки з наступним затягування кабелю цією смужкою
3. "задування" та "заштовхування" безпосередньо кабелю – пневматична прокладка

Найсучаснішим способом прокладки є пневматична, – на вході до захисної труби встановлюється пристрій (рисунок 4), який заштовхує кабель всередину труби механічно, та пневматично (на кінці закріплено герметизуючий пристрій, – "парашут").

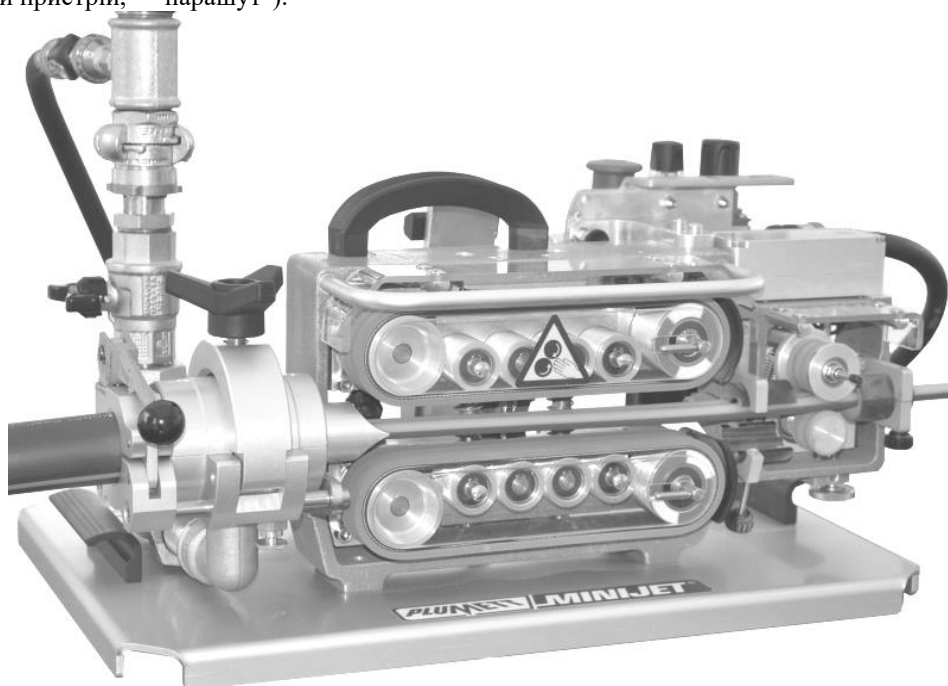


Рисунок 4 – Пристрій для розміщення кабелів у труби фірми SHERMAN+REILLY™ (USA), модель MiniJet® [3]

Основними технічними перевагами методу пневматичної прокладки є відсутність зосереджених тягнучих зусиль, що діють на оптоволоконний кабель в процесі його просування по каналу, зведення до мінімуму вимог до працюючих на стиск зміцнювальних покриттів окремих світловодів і їх збірок, економія дефіцитної площі кабельних каналів і можливість заміни розгалужувальних муфт на розгалужувальні муфти трубчатих каналів [4, с. 330].

Такий спосіб дозволяє уникнути значних механічних навантажень, що у свою чергу дозволяє використати економний слабо армований кабель. Прикладом є кабелі марки O-CFP(SR)D-24E9/125 зовнішній діаметр якого 10,4 мм; динамічна сила натягування – 600 Н; вага – 113 кг/км; ціна 26,19 грн/м. п. [5], та кабель марки O-CFP(SR)D-24E9/125/Flex зовнішній діаметр якого 9,6 мм, динамічна сила натягування – $N_{\text{макс}}=300$ Н; вага – $M=96$ кг/км; ціна 24,60 грн/м.п. Оболонку кабелів та захисної труби виготовлено з поліетилену високої густини, динамічний коефіцієнт тертя відповідно $\mu=0,13$, що дозволяє прокласти кабель, без змашування і його пошкодження на максимальну довжину, м:

$$N = LMg\mu < N_{\text{і доп}} \Rightarrow L < \frac{N_{\text{і доп}}}{Mg\mu} = \frac{300}{96 \cdot 9,81 \cdot 0,13} = 2450$$

В той-же час довжина захисної труби у бухті може доходити до 5000 м.

Використання у конструкції захисної труби внутрішнього антифрикційного шару (рисунок 5, позиція 5) дозволяє зменшити динамічний коефіцієнт тертя до $\mu=0,06$, а довжину прокладки до 5,3 км [6].

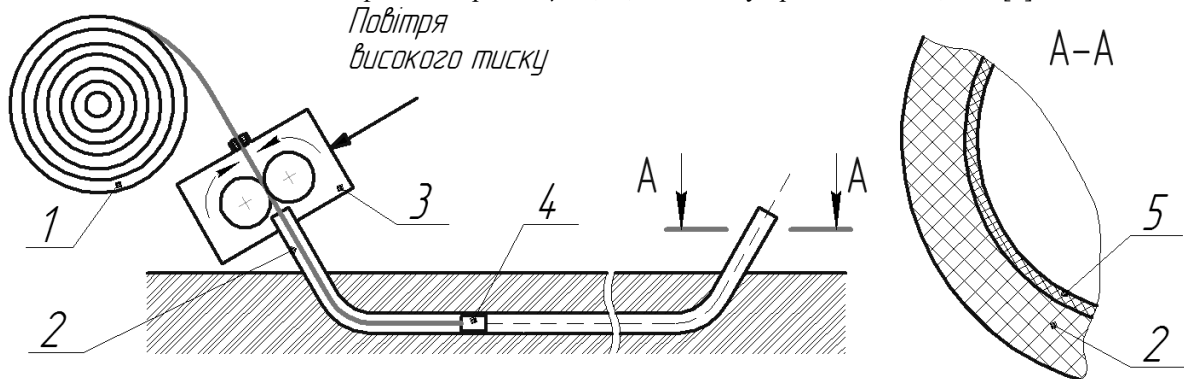


Рисунок 1 – Принципова схема прокладки оптоволоконного кабелю методом пневматичної укладки

1 – бухта оптоволоконного кабелю; 2 – захисна поліетиленова труба;

3 – пристрій; 4 – парашут; 5 – антифрикційний шар

Матеріалом для антифрикційного шару на внутрішній поверхні захисної труби є композиція силікону і високомолекулярного поліетилену високої щільності.

Висновок: виготовлення обладнання для екструзії полімерної композиції антифрикційного шару труб для захисту оптоволоконного кабелю є актуальним, а дослідження процесу екструзійного перемішування даної композиції – важливим. Базовим параметром якості антифрикційного шару приймається динамічний коефіцієнт тертя, значення якого має бути $0,1 \div 0,075$.

Перелік посилань:

1. <http://www.planetaplast.com/kontakti/> (дата звернення: 22.05.2017)
2. <http://www.rtz.com.ua/gallery.html> (дата звернення: 22.05.2017)
3. http://sherman-reilly.com/news/products_list/minijet/ (дата звернення: 22.05.2017)
4. Семенов А. Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС / Семенов А. Б. – М.: Академия АйТи; ДМК Пресс, 2006. – 632 с., ил.
5. <http://asp24.com.ua/made-in-ukraine/otl-m-2-7-p-8x12e1-96-volokon/> (дата звернення: 17.10.2016).
6. Двойнос Я.Г., Гоцький Я. Г. Захисні поліетиленові труби для оптоволоконних кабелів зв'язку //Збірник тез доповідей XI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (06-07 грудня 2016 р. м. Київ), С. 40–41.

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ РОЗПЛАВУ
КОМПОЗИЦІЇ ПОЛІЕТИЛЕН – КАУЧУК
MATHEMATICAL MODEL OF HOMOGENIZATION MELT
COMPOSITION POLYETHYLENE - RUBBER**

**магістрант Гоцький Я. Г., к.т.н, ст. викл. Двойнос Я. Г., Національний
технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ**

**undergraduate Hotskij Y.G., Ph.D., senior lecturer Dvoinos Y.G.,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv**

Анотація. Робота присвячена моделюванню процесу змішування та диспергування силіконового каучуку з розплавом поліетилену з у робочих зазорах одночервячного екструдера та зазорах змішуючого спірального елемента Маддока. Приділено увагу технологічності елемента змішуючого, та інтеграції методів формоутворення до геометричних умов фізичної моделі, що дозволяє наблизити розрахунки до реальної конструкторської розробки. Проведено аналіз відомих гідродинамічних моделей та методів визначення якості змішування за накопиченою деформацією.

Відповідно до технології переробки композиції обґрунтовано вимоги до якості змішування та температури розплаву, що дозволило сформулювати критерій якості процесу та мету моделювання: встановлення залежностей якості процесу змішування від основних геометричних параметрів інструменту.

В результаті чисельного експерименту отримано критичні параметри, які можуть бути використані при проектуванні екструзійного обладнання.

Робота в першу чергу зацікавить інженерів-конструкторів екструзійного та нестандартного обладнання для переробки полімерних матеріалів.

Abstract. The work is devoted to modeling the process of mixing and dispersion of silicone rubber with molten plastic from working in the gaps and gaps one screw extruder mixing spiral element Maddoka. Attention is paid to the technological element of the mixing and integration methods of forming geometrical conditions to the physical model, allowing calculations to approximate the real design project. The analysis of known hydrodynamic models and methods for determining the quality of mixing accumulated strain.

According to the technology of processing compositions justified demands for quality mixing and temperature of the melt-themes, which allowed formulating quality criteria and objective process modeling: depending installation as the mixing of basic geometric parameters of the tool.

As a result of numerical experiments obtained characteristic equation may be use the design of extrusion equipment.

Working primarily interested in design engineers and non-standard extrusion equipment processing of polymeric materials.

Ключові слова: каучук з силікону, індекс перемішування, розплав поліетилену, екструдер, черв'як екструдера.

Keywords: rubber silicone, mixing index, melt plastic, extruder, extruder screw.

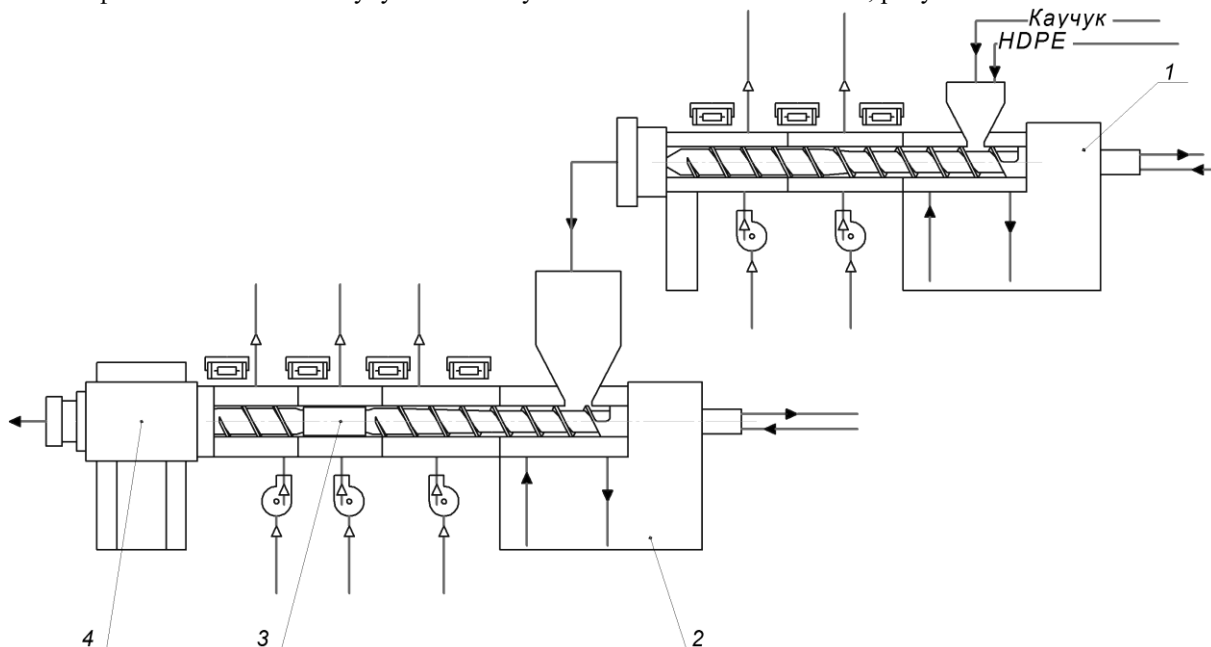
Переробка та створення нових композицій на основі полімерів є актуальним, оскільки ці матеріали отримують кращі експлуатаційні характеристики, а саме, при незначному додаванні каучуку до полімеру збільшуються механічні характеристики отриманої композиції, такі як еластичність, удароміцність та морозостійкість. Світова компанія DuPont використовує концентрати з первинними амідами жирних кислот на основі рослинної сировини для отримання композиції з низьким коефіцієнтом тертя.

Каучук з силікону марки СКТН [1] Запорізького державного підприємства "Кремнійполімер" разом з МФСН-В (затверджувач і стабілізатор) та поліетиленом утворюють композицію з антифрикційними властивостями, які дозволяють використати новий матеріал як антифрикційне покриття внутрішньої поверхні труб захисних з поліетилену для монтажу оптоволоконних кабелів зв'язку. Перевага силіконових добавок у стабільності властивостей, – полімеризований високомолекулярний силіконовий каучук не розчиняється у поліетилені, і відповідно, не мігрує в середину стінки труби. Крім того, температура менше впливає на коефіцієнт тертя. Відомий мастербатч Dow Corning® MB25-035 фірми DOW CORNING на основі силікону.

Традиційно, технологія екструзії таких композицій передбачає створення гранульованого концентрату, який у екструдері внутрішнього шару перемішується з основним матеріалом. Відповідно, концентрат містить значно більшу концентрацію адитивів.

Процес виробництва поліетилен-каучукових композицій є складним оскільки важко досягти рівномірного розподілу каучуку по всьому об'єму матеріалу. Основним обладнанням виробництва концентратів є двочерв'ячний або осцилюючий екструдер, – це обладнання має високі показники змішування та диспергування.

На підприємстві ТОВ "Технопласт", м. Боярка впроваджено технологію виготовлення композицій поліолефінів з силіконовим каучуком за наступною технологічною схемою, рисунок 1.



1 – екструдер одночерв'ячний №1 (механічно перетирає суміш); 2 – екструдер одночерв'ячний №2;

3 – змішувачий елемент екструдера; 4 – гранулююча головка.

Рисунок 1 – Технологічна схема виробництва гранульованого концентрату поліетилену з силіконовим каучуком

Конструкція змішувачого елементу, – спіральний елемент Маддока, рисунок 2, 3.

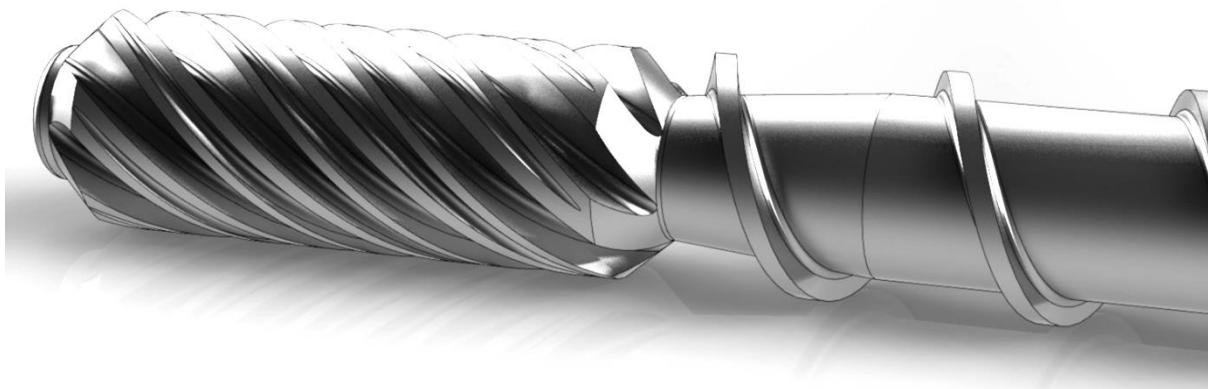
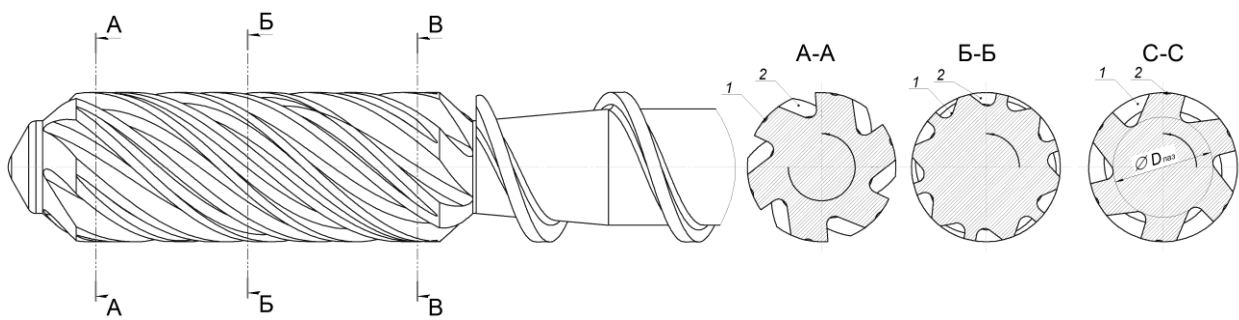


Рисунок 2 – Зовнішній вигляд спірального елемента Маддока

Перевагою спіральної форми елемента Маддока є більша довжина зазору, через який має переміститись полімерна композиція, що забезпечує зменшення тиску у напірних каналах (позиція 1 рисунку 3).



1 – канал напірний (перед робочим зазором); 2 – канал відводу (після робочого зазору);
Рисунок 3 – Креслення спірального елемента Маддока

Спростивши модель спірального елемента до звичайного, у якого довжини зазорів однакові, рисунок 4.

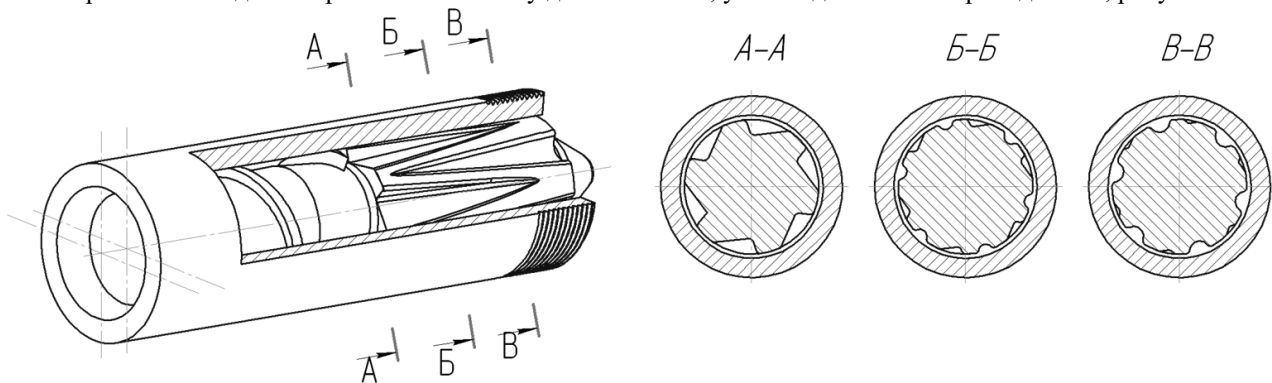
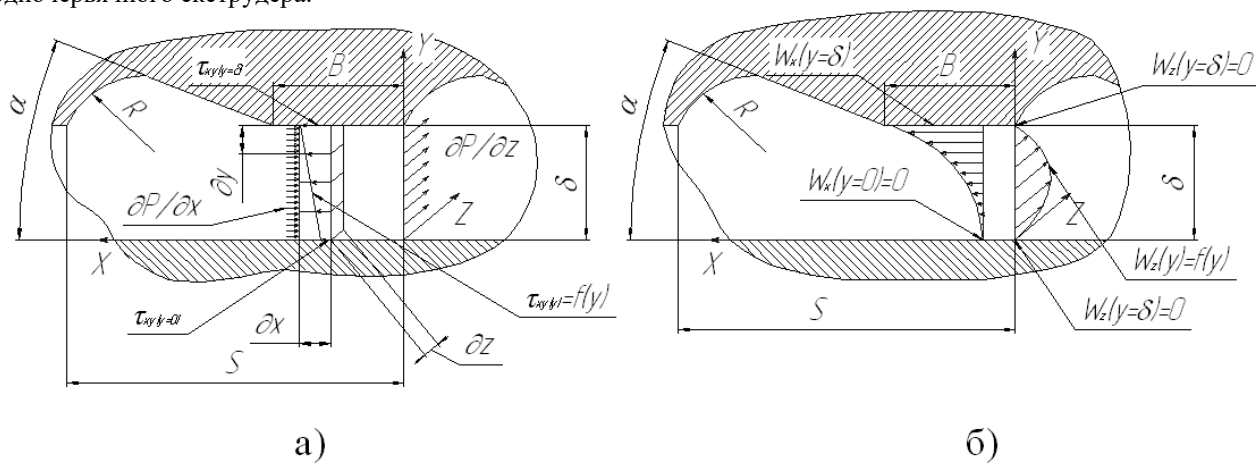


Рисунок 4 – Схема змішувальної секції екструдера, еквівалентної спіральному елементу Маддока

На рисунку 5 зображено фізичну модель процесу змішування розплаву полімеру у каналі насадки шнека одночервячного екструдера.



а) – геометричні умови та сили, що діють на розплав полімеру;
б) – граничні умови швидкості потоку.

Рисунок 5 – Фізична модель процесу змішування полімеру в змішувальній секції екструдера

Рух розплаву полімеру в каналі насадки шнека є складним, тому для визначення ефективної в'язкості μ_{ef}

використовується другий інваріант швидкості зсуву: $\mu_{ef} = \mu_0 \left(\frac{I}{2} \right)^{\frac{n-1}{2}}$, де μ_0 – в'язкість при нульовому зсуву;

I – другий варіант тензора швидкостей деформації; n – реологічна константа: $I_{II} = 2 \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]$.

Зробив припущення плоско паралельної моделі отримаємо рівняння рівноваги сил, що діють на розплав у робочих зазорах насадки:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}; \quad \tau_{xz} = \mu_{ef} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right); \quad \tau_{yz} = \mu_{ef} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

де μ_{ef} – в'язкість ньютонівської рідини; V – швидкість потоку; τ_{xz} , τ_{yz} – напруження зсуву.

Критерієм якості змішування є величина накопиченої деформації зсуву: $\bar{\gamma} = \bar{\dot{\gamma}} t$. Середня швидкість зсуву:

$\bar{\dot{\gamma}} = \frac{1}{b\delta} \int_0^\delta \int_0^b \frac{I_{22}}{2} dx dy$, де b – довжина елемента насадки, м. Середній час перебування частинок розплаву:

$t = \frac{V}{Q}$, де V – об'єм апарату, м³; Q – витрати, м³/с.

Висновок: геометричні умови течії композиції розплаву у клиновому зазорі напірного каналу викликають появу додаткового гідравлічного тиску, що дозволяє зменшити значення робочого зазору при збереженні продуктивності змішуючого елемента та уникнути проковзування розплаву по стінках каналу. Ефективність роботи спірального елемента Маддока напряму залежить від напірної характеристики екструдера та швидкості обертання черв'яка, однак має межу, обумовлену перегрівом розплаву та початком механодеструкції $\bar{\dot{\gamma}} \geq 500 \text{ с}^{-1}$ (температура композиції на вході в зазор 200°C, після зазору – 270°C).

Перелік посилань:

1. <http://silic.com.ua/index.php?Lev=silicone-rubbers> (дата звернення: 17.05.2017).
2. <http://www.extrusionwiki.com/wiki/2003BestPaper.ashx> (дата звернення: 17.10.2016).
3. Ким В. С., Скачков В. В. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс. – М.: Химия, 1988. – 240 с., ил.

Тези:

Збірник тез доповідей XI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"

УДК 624.016

ЗАХИСНІ ПОЛІЕТИЛЕНОВІ ТРУБИ ДЛЯ ОПТОВОЛОКОННИХ КАБЕЛІВ ЗВ'ЯЗКУ

магістрант Гопький Я. Г., ст. викл. Двойнос Я. Г.

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Сучасний розвиток інформаційних технологій спрямовано на зменшення вартості та енергозатрат прокладання, мінімізації кількості з'єднань телекомунікаційних оптоволоконних мереж.

Телекомунікаційний оптоволоконний кабель, найчастіше прокладається в канал (захисна труба з поліетилену), який закопано в ґрунт. Це забезпечує надійний захист кабелю від зовнішніх чинників, таких як несприятливі погодні явища, господарська діяльність людини тощо.

Одним з найсучасніших способів прокладки є пневматична, – на вході до захисної труби встановлюється пристрій (рисунк 1), який заштопує кабель всередину труби механічно, та пневматично (на кінці закріплено герметизуючий пристрій, – "парашут"). Основними технічними перевагами методу пневматичної прокладки є відсутність зосереджених тягнучих зусиль, що діють на оптоволоконний кабель в процесі його просування по каналу, зведення до мінімуму вимог до працюючих на стиск зміцнювальних покриттів окремих світловодів і їх збірок, економія дефіцитної площі кабельних каналів і можливість заміни розгалужувальних муфт на розгалужувальні муфти трубчатих каналів [1, с. 330].

Такий спосіб дозволяє уникнути значних механічних навантажень, що у свою чергу дозволяє використати економічний слабо зрмований кабель. Прикладом є кабелі марки O-CFP(SR)D-24E9/125 зовнішній діаметр якого 10,4 мм; динамічна сила натягування – 600 Н; вага – 113 кг/км; ціна 26,19 грн/м. п. [2], та кабель марки O-CFP(SR)D-24E9/125/Flex зовнішній діаметр якого 9,6 мм, динамічна сила натягування – $N_{max}=300$ Н; вага – $M=96$ кг/км; ціна 24,60 грн/м.п. Оболонку кабелів та захисної труби виготовлено з поліетилену високої густини,

динамічний коефіцієнт тертя відповідно $\mu=0,13$, що дозволяє прокласти кабель, без його пошкодження на максимальну довжину

$$N = LMg\mu < N_{\text{доп}} \Rightarrow L < \frac{N_{\text{доп}}}{Mg\mu} = \frac{300}{96 \cdot 9,81 \cdot 0,13} = 2,45 \text{ кіл. В той-же час довжина}$$

захисної труби у бухті може доходити до 5000 м.

Використання у конструкції захисної труби внутрішнього антифрикційного шару (рисунок 1, позиція 5) дозволяє зменшити динамічний коефіцієнт тертя до $\mu=0,06$, а довжину прокладки до 5,3 км.

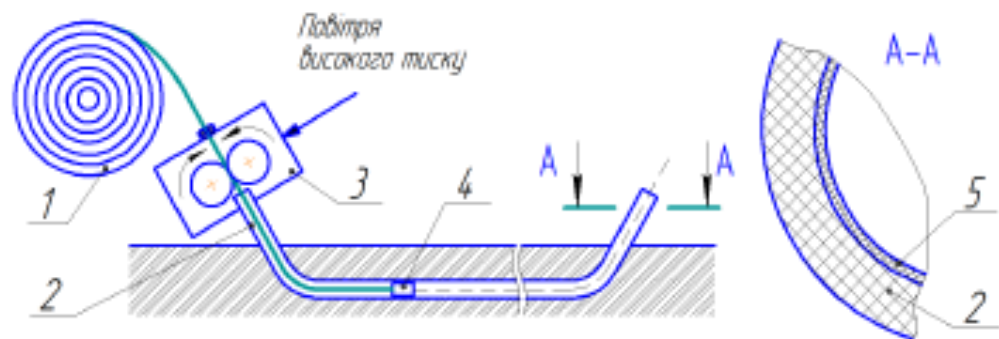


Рисунок 1 – Принципова схема прокладки оптоволоконного кабелю методом пневматичної укладки

- 1 – бухта оптоволоконного кабелю; 2 – захисна поліетиленова труба;
3 – пристрій; 4 – парашут; 5 – антифрикційний шар

Матеріалом для антифрикційного шару на внутрішній поверхні захисної труби є композиція силікону і високомолекулярного поліетилену високої щільності.

Висновок: виготовлення обладнання для екструзії полімерної композиції антифрикційного шару труб для захисту оптоволоконного кабелю є актуальним, а дослідження процесу екструзійного перемішування даної композиції – важливим.

Перелік посилань:

1. Семенов А. Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС / Семенов А. Б. – М.: Академия АИТи, ДМК Пресс, 2006. – 632 с., ил.
2. <http://asp24.com.ua/made-in-ukraine/otl-m-2-7-p-8x12el-96-volokon/> (дата звернення: 17.10.2016).

ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ РОЗПЛАВУ КОМПОЗИЦІЇ ПОЛІЕТИЛЕН-КАУЧУК

магістрант Гоцький Я. Г., к.т.н., ст. викл. Двойнос Я. Г.

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Процес переробки та створення принципово нових композицій на основі полімерів та інших матеріалів є актуальним, оскільки ці матеріали отримують кращі експлуатаційні характеристики. А саме при незначному додаванні каучуку до полімеру збільшуються механічні характеристики отриманої композиції, такі як еластичність, удароміцність та морозостійкість.

Процес виробництва поліетилен-каучукових композицій є складним, оскільки важко досягти рівномірного розподілу каучуку по всьому об'єму матеріалу. Саме тому створення нових методів моделювання цього процесу та модернізацію обладнання актуальним.

На рисунку 1 зображено фізичну модель процесу змішування розплаву полімеру у каналі насадки шнека екструдера, конструкцію насадки зображено на рисунку 2.

Рух розплаву полімеру в каналі насадки шнека є складним, тому для визначення ефективної в'язкості μ_{ef} використовується другий інваріант

швидкості зсуву: $\mu_{\text{ef}} = \mu_0 \left(\frac{I}{2} \right)^{\frac{n-1}{n}}$, де μ_0 – в'язкість при нульовому зсуву; I –

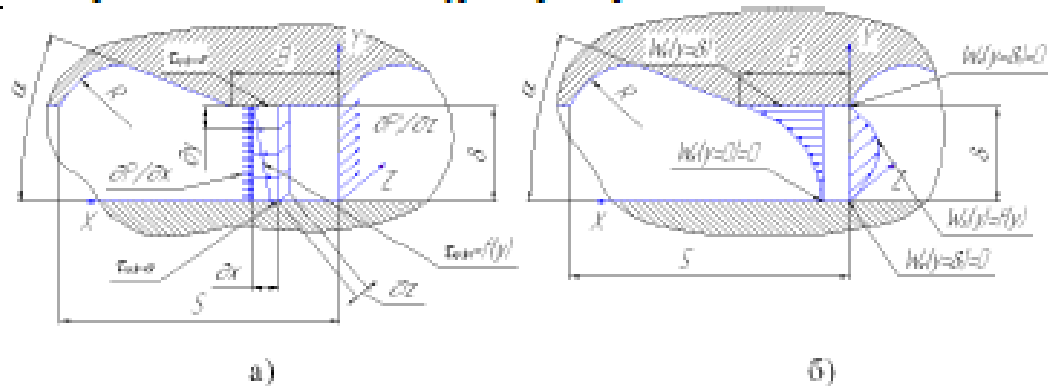
другий варіант тензора швидкостей деформації; n – реологічна константа:

$$I = 2 \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right].$$

Зробив припущення плоско паралельної моделі отримаємо рівняння рівноваги сил, що діють на розплав у робочих зазорах насадки:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}; \quad \tau_{xx} = \mu_{\text{ef}} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right); \quad \tau_{yx} = \mu_{\text{ef}} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

де μ_{ef} – в'язкість ньютонівської рідини; v – швидкість потоку; τ_{xx} , τ_{yx} – напруження зсуву.



а – геометричні умови та сили, що діють на розплав полімеру;
б – граничні умови швидкості потоку.

Рисунок 1 – Фізична модель процесу змішування полімеру в змішувальній секції екструдера

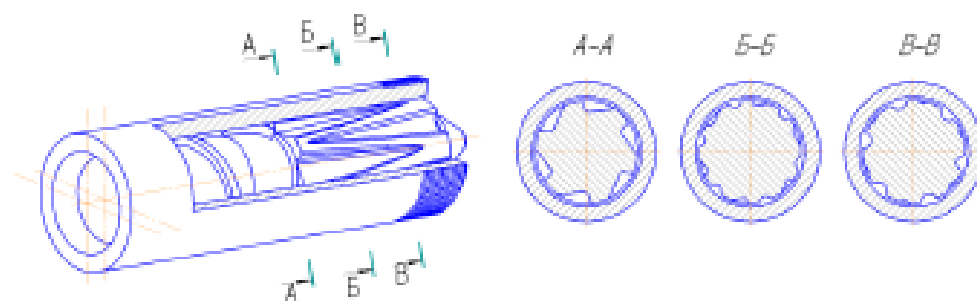


Рисунок 2 – Схема змішувальної секції екструдера

Критерієм якості змішування є величина накопиченої деформації зсуву: $\bar{\gamma} = \bar{\gamma}t$

Середня швидкість зсуву: $\bar{\dot{\gamma}} = \frac{1}{b\delta} \int_0^\delta \int_0^b \frac{I_w}{2} dx dy$, де b – довжина елемента

насадки, м. Середній час перебування частинок розплаву: $t = \frac{V}{Q}$, де V – об'єм апарату, м³; Q – витрати, м³/с.

Перелік посилань:

1. Ким В. С., Скачков В. В. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс. – М.: Химия, 1988. – 240 с., ил.

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІЕТИЛЕН-КАУЧУКОВИХ КОМПОЗИЦІЙ

магістрант Гоцький Я.Г., ст. викл. Двойнос Я.Г.

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

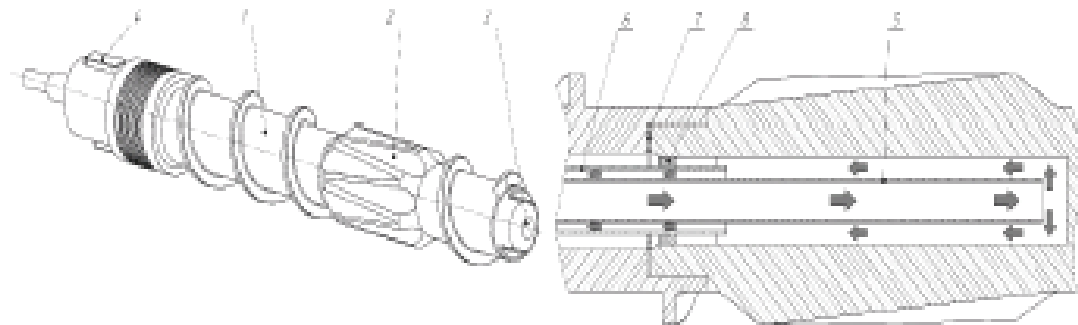
Зростають потреби в створенні міцних, зносостійких та бюджетних матеріалів. До них відносяться полімерні композиції, які мають нові властивості, наприклад композиція поліетилен – силіконовий каучук має антифрикційні властивості і використовується при виготовленні внутрішнього шару захисних поліетиленових труб оптоволоконних мереж. Саме тому питання створення та модернізації обладнання для переробки полімерних композицій є актуальним. При переробці таких композицій найбільш критичним процесом є диспергування та перемішування наповнювачів, таких як пластифікатори, стабілізатори, барвники та інші добавки, що надають специфічні властивості отриманій композиції.

Процес диспергування та перемішування високов'язкого розплаву полімер-каучукової композиції, супроводжується інтенсивною деформацією, яка викликає розігрів по всьому об'єму, що може викликати термічну деструкцію та погіршення основних показників.

Традиційно в зоні плавлення та гомогенізації екструдера на шнеку додатково встановлюють змішувальну насадку. Найбільш відомою конструкцією є змішувачий елемент Меддока [1]. Елемент виконано в розриві гвинтової нарізки шнека екструдера у вигляді повздовжніх вхідних та вихідних каналів, які з'єднані між собою кільцевим зазором між виступами елемента та циліндром. Проходячи кільцевий зазор розплав піддається високій швидкості зсуву, за рахунок чого агломерати у розплаві руйнуються та досягається мета – інтенсивне диспергуюче змішування.

З метою підвищення продуктивності обладнання запропоновано виконати

Збірник тез доповідей XIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" систему охолодження змішувального елемента шнека [2, рисунок 1].



1 – шнек; 2 – елемент змішувальний; 3 – конус шнека; 4 – шпонки передачі крутного моменту; 5 – внутрішня труба; 6 – зовнішня труба; 7, 8 – ущільнення

Рисунок 1 – Схема модернізованої конструкції шнеку

Суть модернізації [2] полягає в тому, що елемент Меддока розташовано на окремій деталі, яка механічно, на різьбі прикручена до заготовки шнека, а у центральному отворі встановлено дві труби, причому труби мають різні діаметри і розташовані одна всередині другої, а охолоджуюча рідина, наприклад вода потрапляє у порожнину деталі з елементом Меддока через трубу малого діаметру і повертається через кільцевий зазор між трубами, таким чином охолоджується тільки частина шнеку на якій розташовано елемент Меддока.

Висновок: модернізація шнека вимагає створення нової методики розрахунку енерговитрат у змішувальному елементі з охолодженням.

Перелік посилань:

1. Басов Н.И., Казанков Ю.В., Любарович В.А. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов: Учеб. для вузов. – М.: Химия, 1986. – 488 с., ил.

2. Заявка на патент України. МПК В29С 47/80, В29С 47/36, В29С 47/88.Шнек екструдера для переробки полімерних матеріалів. Я.Г.Гоцький, Я.Г.Двойнос; заявники вони ж. – № u 2017 09630; заявл. 02.10.2017.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ РОЗПЛАВУ КОМПОЗИЦІЇ ПОЛІЕТИЛЕНУ ТА КАУЧУКУ

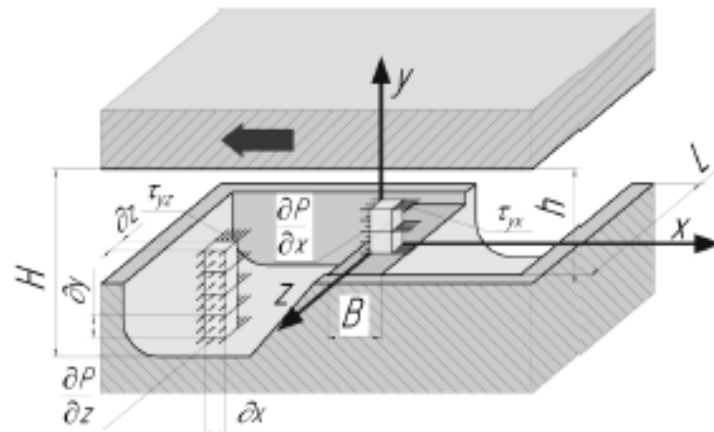
магістрант Гоцький Я.Г., ст. викл. Двойнос Я.Г.

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Процеси змішування та диспергування при екструзії найбільше впливають на якість розплаву, слідуючи з цього і якості виробу, який буде виготовлятися. Ці процеси в загальному випадку називаються процесами гомогенізації.

Дослідженню процесу гомогенізації присвячено багато теоретичних і експериментальних робіт [1]. Для проектування нового екструзійного обладнання та дослідження цих процесів необхідно дослідити вплив основних параметрів на процес змішування, саме тому моделювання даного процесу є важливим. Схема процесу диспергуючого змішування розплаву композиції полімеру в змішувальному елементі одночерв'ячного екструдера наведено на рисунку 1.



H – глибина каналу; h – глибина зазору між корпусом та змішувальною секцією;

B – ширина робочого зазору; L – довжина каналу; $\delta x, \delta y, \delta z$ – розміри елементарного об'єму; $\partial P / \partial x$ – градієнт тиску в поперечному напрямі;

$\partial P / \partial z$ – градієнт тиску в повздовжньому напрямі

Рисунок 1 – Геометричні умови та сили, що діють на розплав полімеру

Патенти на корисну модель:

 Державне підприємство "Український інститут інтелектуальної власності" (УКРПАТЕНТ)
(01601, м. Київ-42, вул. Глазунова, 1)

Розписка про одержання заявки на корисну модель
Вх.№251041 Дата одержання 02.10.2017 15:53:15 28


Номер заявки u 2017 09630 (в подальшому обов'язково посилатись на цей номер)

Заявник Гоцький Ярослав Григорович


Назва корисної моделі ШНЕК ЕКСТРУДЕРА ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Адреса для листування Двойнос Я.Г., вул. М. Амосова, 14, кв. 7, м. Київ, 03038

Подані матеріали
17/ЗУ/Вх№63873 Заява про видачу патенту на винахід (КМ)
17/ЗУ/Вх№63876 Формула винаходу (КМ) (арк. - 1, прим. - 3).
17/ЗУ/Вх№63874 Опис винаходу (КМ) (арк. - 2, прим. - 3).
17/ЗУ/Вх№63875 Реферат (арк. - 1, прим. - 3).
17/ЗУ/Вх№63877 Креслення (арк. - 1, прим. - 3).
17/ЗУ/Вх№63878 Квитанція № 20096005-1, дата 29.09.2017, сума 40,00 грн.



Прийняв(ла) _____ Гуртова Т.В.

 Державне підприємство "Український інститут інтелектуальної власності" (УКРПАТЕНТ)
(01601, м. Київ-42, вул. Глазунова, 1)

Розписка про одержання заявки на корисну модель
Вх.№32703 Дата одержання 28.02.2018 15:26:47

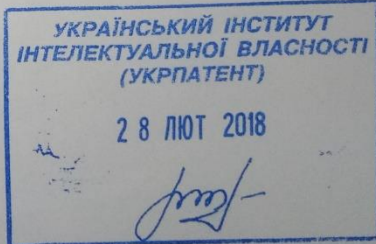
Номер заявки u 2018 02087 (в подальшому обов'язково посилатись на цей номер)

Заявник Гоцький Ярослав Григорович

Назва корисної моделі ЗМІШУВАЛЬНА СЕКЦІЯ ЧЕРВ'ЯКА ЕКСТРУДЕРА

Адреса для листування Гоцький Ярослав Григорович, вул. Новодарницька, 30, кв. 56, м. Київ, 02099

Подані матеріали
18/ЗУ/Вх№13506 Заява про видачу патенту на винахід (КМ)
18/ЗУ/Вх№13509 Формула винаходу (КМ) (арк. - 1, прим. - 3).
18/ЗУ/Вх№13507 Опис винаходу (КМ) (арк. - 3, прим. - 3).
18/ЗУ/Вх№13508 Реферат (арк. - 1, прим. - 3).
18/ЗУ/Вх№13510 Креслення (арк. - 1, прим. - 3).



Прийняв(ла) _____ Литвинова Ж.В.